Departamento de Agricultura de los Estados Unidos

Servicio Forestal

Traducción - Informe Técnico General WO-65

Julio 2004

El Karso de Puerto Rico — Un Recurso Vital

Ariel E. Lugo[1], Leopoldo Miranda Castro[2], Abel Vale[3], Tania del Mar López[1], Enrique Hernández Prieto[4], Andrés García Martinó[1], Alberto R. Puente Rolón[5], Adrianne G. Tossas[6], Donald A. McFarlane[7], Tom Miller[8], Armando Rodríguez[9], Joyce Lundberg[10], John Thomlinson[11], José Colón[3], Johannes H. Schellekens[8], Olga Ramos[1] y Eileen Helmer[1].

PORTADA: *Parte de la franja kárstica en la región noroeste de Puerto Rico, en una imagen captada por el Landsat Thematic Mapper en 1992 con bandas TM 7, 5, 2, en espacio de color rojo-verde-azul (RGB, por sus siglas en inglés). El área se delimita al este por el río Grande de Arecibo y el embalse Dos Bocas, extendiéndose hasta el río Guajataca y el embalse Guajataca al oeste. El río Camuy, al centro, fluye con los otros dos ríos por cañones de impresionantes pendientes casi verticales, las cuales crean las sombras visibles en la imagen. Ambos embalses, de color negro en la imagen, son de importancia crítica para los abastos de agua de toda la isla. El área del bosque aparece como un manto verde oscuro que divide las lomas del karso y representa parte de la zona propuesta para conservación. Las áreas que varían desde rosa pálido a blanco representan las zonas urbanas, que incluyen la ciudad costera de Arecibo, visible en el cuadrante superior derecho de la imagen. Las tierras agrícolas y pastizales aparecen de amarillo intenso a verde pálido.*

El Karso de Puerto Rico – Un Recurso Vital

Informe Técnico General WO-65*
Julio 2004

Ariel E. Lugo[1], Leopoldo Miranda Castro[2], Abel Vale[3], Tania del Mar López[1], Enrique Hernández Prieto[4], Andrés García Martinó[1], Alberto R. Puente Rolón[5], Adrianne G. Tossas[6], Donald A. McFarlane[7], Tom Miller[8], Armando Rodríguez[9], Joyce Lundberg[10], John Thomlinson[11], José Colón[3], Johannes H. Schellekens[8], Olga Ramos[1] y Eileen Helmer[1].

1. Instituto Internacional de Dasonomía Tropical
   USDA Forest Service
   Jardín Botánico Sur, 1201 Calle Ceiba
   San Juan, PR 00926-1119

2. Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE.UU.
   Oficina del Caribe, P.O. Box 491
   Boquerón, PR 00622-0491

3. Ciudadanos del Karso
   497 Ave. E. Pol, Aptdo. 230
   San Juan, PR 00926-5636

4. Departamento de Biología
   Colegio Universitario de Humacao
   Universidad de Puerto Rico, Estación Postal
   CUH, Humacao, PR 00791-4300

5. P.O. Box 1112, Ciales, PR 00638

6. Villas del Río
   1100 Calle Bambú
   Mayagüez, PR 00680-7166

7. W.M. Keck Science Center
   The Claremont Colleges
   925 North Mills Ave
   Claremont, CA 91711

8. Departamento de Geología,
   Universidad de Puerto Rico, RUM
   P.O. Box 9017 Mayagüez, PR 00681-9017

9. Departamento de Biología
   Universidad Interamericana,
   Carr. 500 Dr. John Will Harris
   Bayamón, PR 00957-6257

10. Department of Geography and Environmental Studies
    Carleton University
    Ottawa, Ontario, K1S5B6, Canadá.

11. Instituto de Estudios de Ecosistemas Tropicales
    Universidad de Puerto Rico
    P.O. Box 363682
    San Juan, PR 00936-3682

* Este documento es una traducción al español del Informe Técnico General WO-65 titulado *Puerto Rican Karst – A Vital Resource*, el cual fue publicado en agosto de 2001 por el Servicio Forestal de los Estados Unidos. Esta publicación se hace posible gracias a un acuerdo cooperativo entre el Instituto Internacional de Dasonomía Tropical y Ciudadanos del Karso.

Indice

Resumen....1
Introducción....2
Geografía de la Región Caliza de Puerto Rico....3
La Franja Kárstica es Espectacular....8
  Zona Silvestre....8
  Diversidad Topográfica....10
  Topografía Accidentada....11
  Paisajes Singulares....12
  Panoramas de Contrastes....12
La Caliza de la Franja Kárstica Data de Muchas Épocas....13
  Clasificación de los Estratos Calizos....16
  Origen del Karso....18
  Desarrollo de la Topografía del Karso....18
La Franja Kárstica es Diversa....20
  Diversidad Geomorfológica....20
    Formaciones de los Valles....20
      Valles Secos....20
      Depresiones Cerradas....21
      Sumideros Rellenos....22
      Valles Cegados....22
    Lomas....22
      Karso de mogote....22
      Karso de Conos....24
    Acantilados Fluviales y Costeros....24
    Zanjones....24
    Cavidades....24
  Diversidad Hidrológica....26
    Ríos y Quebradas....26
      Río Culebrinas....28
      Río Guajataca....28
      Río Camuy....28
      Río Grande de Arecibo....28
      Río Grande de Manatí....29
      Río Cibuco....29
      Río de La Plata....29
    Acuíferos....30
    Embalses, Lagunas, Charcas y Humedales....34
    Manantiales y Cascadas....36
  Diversidad Ecológica....38
    Vegetación Terrestre....38
    Humedales....43
    Estuarios....43
La Franja Kárstica Contiene Recursos Naturales Muy Valiosos....44
  Flora y Fauna Fósil....44
    Flora....45
    Fauna....46
    Macrofauna Acuática....46
    Invertebrados de las Cavidades....48
    Reptiles y Anfibios....48
    Aves....52
    Mamíferos....58
  Especies Endémicas y en Peligro de Extinción....59
    Flora....60
    Fauna....62
La Franja Kárstica Tiene Importancia Económica....64
  Agua....67
  Otros Minerales....69
  Agricultura....70
  Silvicultura....73
  Perturbaciones Ambientales....73
    Derrumbes y Subsidencia....74
    Inundaciones, Huracanes y Sequías....75
      Río Culebrinas....75
      Río Guajataca....75
      Río Camuy....75
      Río Grande de Arecibo....75
      Río Grande de Manatí....76
      Río Cibuco y el río Indio....76
      Río de La Plata....76
La Franja Kárstica Ha Sido Usada Intensamente....76
La Franja Kárstica Es Vulnerable a la Actividad Humana....77
  ¿Cortar o pavimentar los bosques?....78
  ¿Drenar o rellenar los humedales?....78
  ¿Convertir o transformar los usos de los suelos?...78
  ¿Bombeo o sobreexplotación de los acuíferos?....79
  ¿Contaminación o envenenamiento del agua subterránea?....80
  Contaminación del Agua de la Superficie....81
La Franja Kárstica Es de Importancia Vital para Puerto Rico y Tiene que Conservarse....82
Importancia de la Franja Kárstica....82
  Conservación de la Franja Kárstica....84
  Propuesta para el Traspaso de Parte de la Franja Kárstica al Dominio Público....86
Agradecimientos....87
Referencias....87
Terminología....97

Resumen

La región de roca caliza de Puerto Rico cubre aproximadamente el 27.5 por ciento de la superficie de la Isla y se subdivide entre la zona caliza del Norte, la zona caliza del Sur y la caliza dispersa. Todas las zonas calizas tienen características de **karso**[1]. Los términos técnicos que aparecen en letra negrita en este informe se definen en la sección de Terminología.. La parte de la zona caliza del Norte con la topografía kárstica más espectacular se denomina "franja kárstica". Esta cubre unas 142,544 ha, el 65 por ciento de la zona caliza del Norte. Este documento se concentra en la franja kárstica, aunque se hace referencia a todas las regiones calizas. La zona caliza del Norte tiene el acuífero de agua dulce más extenso, la extensión continua más amplia de bosque maduro y los más extensos humedales costeros, **estuarios** y **sistemas de cavidades** subterráneas de Puerto Rico. La franja kárstica es sumamente diversa y su variada topografía, concentrada en un área tan limitada, la hace única en el mundo. Los bosques del karso puertorriqueño, secos, húmedos o muy húmedos, comparten características fisonómicas y estructurales. Los bosques del karso contienen el mayor número registrado de especies de árboles por unidad de área en Puerto Rico. En ellos encontramos una abundancia de taxones de fauna y flora; y muchas especies raras, amenazadas, en peligro de extinción y migratorias encuentran refugio en la franja kárstica. Casi todo el registro fósil de la flora y fauna extinta de Puerto Rico proviene de esta franja. Veintidós por ciento de la población de la isla utiliza agua subterránea. La zona caliza del Norte suple el 22 por ciento del agua dulce extraída por las entidades públicas de la Isla. Setenta y nueve por ciento del agua extraída en la zona caliza del Norte es agua subterránea y 340,000 personas utilizan esta agua. La construcción en el karso es difícil, costosa y peligrosa. Debido a lo accidentado del terreno y la pobreza del suelo para fines agrícolas, la densidad poblacional de la franja kárstica es baja y el impacto humano al paisaje ha sido mínimo. La franja kárstica se considera una zona silvestre, de sistemas ecológicos y subterráneos y de formaciones kársticas. Parte de la franja se caracteriza por las pocas viviendas, la cubierta forestal continua, las pocas carreteras y la ausencia de agricultura comercial. De hecho, la franja kárstica de Puerto Rico actualmente representa uno de los hábitats kársticos menos intervenidos que queda en el Caribe. Sin embargo, la región caliza en general es vulnerable a las actividades humanas, incluyendo el corte de vegetación, la pavimentación de bosques, la desecación y el relleno de humedales, la conversión y transformación de usos de terrenos, la sobreexplotación de los acuíferos y la contaminación y el envenenamiento del agua subterránea. En la zona caliza del Norte, la población rural descarga todas las aguas usadas directamente al ambiente natural. El karso es vital para Puerto Rico porque sus recursos naturales y condiciones ambientales proveen servicios esenciales al resto de la Isla, sosteniendo la calidad de vida y una economía próspera. El agua, la recreación, los espacios abiertos, los paisajes, la biodiversidad, la zona silvestre, las funciones ecológicas y los recursos naturales abundantes son productos y servicios que ofrecen los terrenos del karso. Hay que conservar el karso de manera que la Isla pueda seguir recibiendo todos los beneficios que este provee. Proponemos que se reserven 39,064 ha (el 27 por ciento) de la franja kárstica. Estas tierras se deben pasar al dominio público para asegurar la conservación del núcleo del karso natural para las generaciones venideras.

"La zona caliza de la costa norte, distante de la zona de San Juan, es una de las pocas áreas escasamente pobladas de Puerto Rico y posee cualidades estéticas y geológicas únicas, además de ser la última fuente de agua subterránea extensa sin desarrollar de la isla."

Giusti y Bennett (1976 p. ii).

[1] Los términos técnicos que aparecen en **letra negrita** en este informe se definen en la sección de **Terminología**.

Introducción

Las imágenes de Puerto Rico captadas por sensores remotos de satélite muestran una banda continua de bosque tupido orientada de este a oeste, desde la esquina noroeste de la isla casi hasta San Juan (véase la portada). Esta franja de bosque tupido sólo se interrumpe por los cañones y valles de varios ríos, como el río Guajataca, el río Camuy, el río Tanama, el río Grande de Arecibo, el río Grande de Manatí, el río Indio, el río Cibuco y el río de La Plata. Estos ríos fluyen al norte hasta el Océano Atlántico, creando bloques de bosque, notables por la escasez de su drenaje superficial (figura 1) y el predominio del drenaje subterráneo. Estas tierras constituyen la franja kárstica de la zona caliza del Norte. Como demostraremos en este trabajo, la franja kárstica ha sido, y sigue siendo, un área natural de importancia crítica en Puerto Rico. Sus vastos recursos naturales nutrían a los puertorriqueños cuando la Isla gozaba de una economía agraria. Sin embargo, la región fue deforestada. Con el abandono de las actividades agrícolas y el acelerado cambio de la economía de la Isla durante la segunda mitad del siglo XX, los bosques se recuperaron y el agua de la región potenció el proceso de la industrialización. Desafortunadamente, la contaminación ha degradado gran parte del agua superficial y el agua subterránea. Hoy por hoy, Puerto Rico se enfrenta a una nueva transformación económica y la franja kárstica está disponible para apoyar una mayor salud ambiental

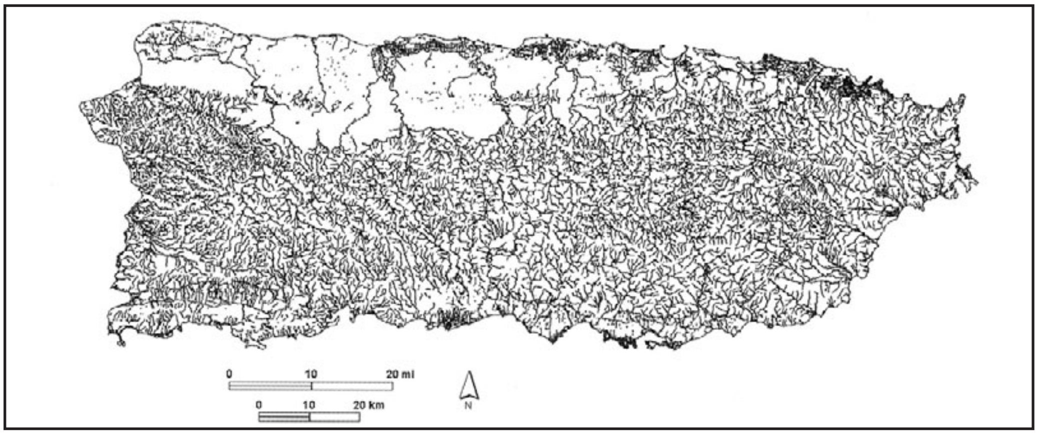

Figura 1. Mapa de Puerto Rico con los ríos, quebradas y canales (Base de datos del Servicio Geológico de EE.UU.). La zona donde no existe una red visible de ríos y quebradas en la costa del Noroeste corresponde al sector de la franja kárstica, donde predomina un patrón de drenaje subterráneo. Algunos de los canales en el Noroeste no son naturales, sino que pertenecen al Distrito de Riego de Isabela.

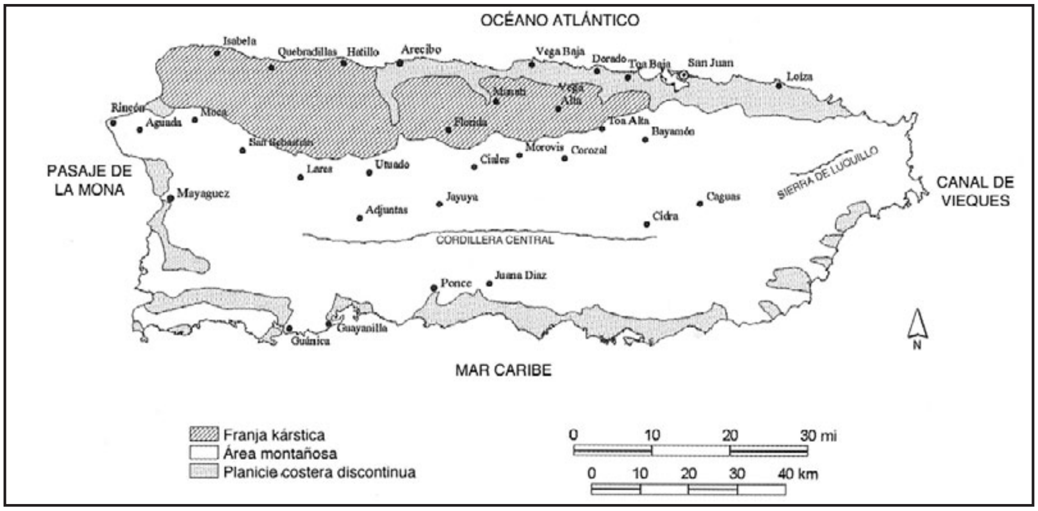

Figura 2. Mapa de Puerto Rico con las principales divisiones fisiográficas (Monroe 1976). La franja kárstica es la zona donde abundan las formaciones kársticas. La roca caliza subyace parte de la planicie discontinua de la costa, como es el caso en la costa norte.

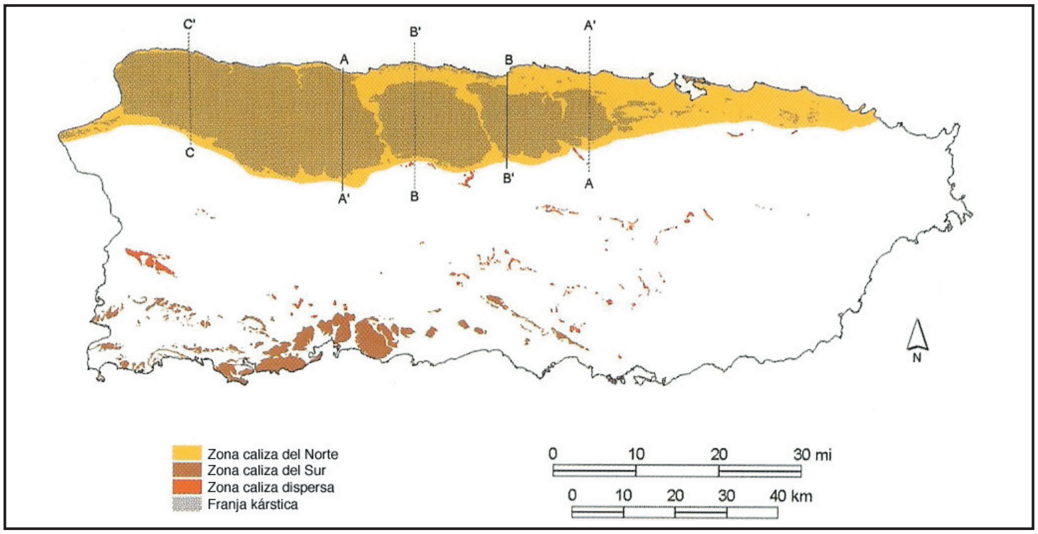

Figura 3. La región caliza de Puerto Rico según Monroe (1976). La zona caliza del norte incluye la franja kárstica. Las líneas verticales con letras identifican la ubicación de los cortes transversales geológicos que se presentan en otra parte de este trabajo.

y calidad de vida que necesitaremos en el siglo XXI. Nuestro objetivo es reseñar la literatura disponible sobre la franja kárstica, con el propósito de justificar una ética de conservación para los valiosos recursos naturales de la franja y para sugerir que se transfiera una parte de la franja kárstica al dominio público.

Geografía de la Región Caliza de Puerto Rico

Picó (1950) subdividió a Puerto Rico en 11 regiones geográficas, una de las cuales eran las colinas húmedas del norte (tabla 1). Esta región geográfica incluía la franja caliza del interior y el cerro Atalaya, pero Picó no reconoció ninguna otra región caliza. Monroe (1976) dividió a Puerto Rico en tres regiones fisiográficas: la franja kárstica, la zona de la montaña y la planicie discontinua costera (figura 2). La planicie discontinua de Monroe incluía karso enterrado sin características de disolución visibles. Por ende, la extensión del karso en Puerto Rico es mucho mayor de lo que implicaba el área de franja kástica de Monroe porque también se dan características del karso fuera de esta.

Para esta reseña, digitalizamos el mapa de 1976 de Monroe de las áreas calizas y formaciones kársticas de Puerto Rico. El mapa no incluía las islas adyacentes, Mona, Monito, Desecheo, Caja de Muertos y Vieques[2]. De éstas, la Isla de Mona es la más importante con respecto a su formación caliza y su biodiversidad (recuadro 1). Utilizando el mapa de Monroe, clasificamos las varias regiones de la isla (figura 3) y calculamos aproximadamente sus áreas (tabla 2).

Utilizamos la siguiente terminología al referirnos a las distintas zonas calizas de Puerto Rico: la región caliza se refiere a todas las zonas calizas de Puerto Rico, incluyendo las zonas donde la roca caliza está enterrada debajo de suelos aluviales o arenas de manto. La región caliza se subdivide en tres zonas: norte, sur y caliza dispersa. La zona caliza del Norte corresponde a la zona de caliza de la costa norte, incluyendo la roca caliza cubierta por arenas de manto y suelos aluviales, y constituye un acuífero subterráneo bien definido. La zona caliza del Sur corresponde a las zonas

continua en la página 5

Tabla 1. Zonas geográficas de Puerto Rico. Esta tabla fue preparada por Fernando Gómez Gómez partiendo de Picó y otros (1975). Los totales varían debido a que se redondearon los números.

Región Geográfica	Área (ha)		Por ciento del Área Total	
1. Planicie costera del norte	119,395		13.3	
A. Zona occidental subhúmeda		33,377		3.7
B. Zona aluvial húmeda		86,018		9.6
2. Valles húmedos de la costa este	27,800		3.1	
A. Zona de Fajardo		9,864		1.1
B. Valles de Naguabo-Humacao		11,365		1.3
C. Valle de Yabucoa		4,939		0.6
D. Valle de Maunabo		1,632		0.2
3. Valle de Caguas	12,868		1.4	
4. Valles de la costa oeste	23,208		2.6	
A. Valle de Culebrinas-Culebras		4,217		0.5
B. Zona de Córsega		462		0.1
C. Valle de Añasco		4,665		0.5
D. Valle de Guanajibo		13,864		1.6
5. Planicie costera del sur	87,779		9.8	
A. Planicie costera de Ponce-Patillas		47,067		5.3
B. Valle de Tallaboa		2,210		0.2
C. Zona de Guayanilla-Guánica		6,080		0.7
D. Valle de Lajas		13,763		1.5
E. Franja de las montañas del Suroeste		18,659		2.1
6. Zona premontana semiárida del Sur	88,270		9.9	
7. Zona premontana semihúmeda del Norte	185,956		20.9	
A. Zona cretácea del Norte		66,549		7.5
B. Franja caliza interior		95,852		10.7
C. Cerro Atalaya		23,555		2.6
8. Montañas húmedas del Este	133,561		15.0	
9. Montañas lluviosas del Oeste	171,168		19.2	
10. Sierra de Luquillo	21,331		2.4	
11. Vieques, Culebra y Mona	21,400		2.4	
A. Vieques		13,200		1.5
B. Culebra		3,000		0.3
C. Mona		5,420		0.6
Total	**892,736**		**100**	

Recuadro 1. La Isla de Mona: La Galápagos del Caribe.

La Isla de Mona, situada entre la República Dominicana y Puerto Rico, es una isla tectónicamente elevada de roca carbonatada, de unas 5,500 ha (Aron 1973, Frank y otros 1998a). La isla tiene forma de meseta, levemente inclinada hacia el sur. En toda su costa hay farallones verticales que se elevan a 20 m sobre el nivel del mar por el sur y hasta 80 m sobre el nivel del mar en el norte. La meseta está formada por dos unidades de carbonatos del Mioceno-Plioceno: la Dolomía Isla de Mona inferior y la Caliza Lirio superior. A lo largo del oeste y suroeste de la isla, se encuentra un arrecife fósil del Pleistoceno, de 3 a 6 metros de altura, que entronca con la base del farallón y forma una estrecha planicie costera (Frank y otros 1998a). Frank y otros (1998b) consideraban que la Isla de Mona era “uno de los lugares más cavernosos de la Tierra”. (p 82). Tarhule, Lips y Ford (1998) sugirieron que la **corrosión por condensación** ocurrió en la entrada de algunas de las cavidades de la Isla de Mona.

continua en la próxima página

[2] Los mapas en las figuras 2 y 16 ilustran las zonas geográficas más importantes que se mencionan en este trabajo.

Recuadro 1. *continuación de la página anterior*

Las formaciones kársticas incluyen (Frank y otros 1998a):

- Una serie de cavidades de flanco desarrolladas en el contacto entre la Caliza Lirio y la Dolomía Isla de Mona y que forman una argolla en la periferia de la isla;
- Una serie de grandes sumideros de formación compuesta conocidos como las Cuevas del Centro;
- Un valle de disolución formado a lo largo de la fractura, conocido como Los Corrales de los Indios;
- El Camino de los Cerezos, una zona de pozos con una gran cantidad de acantilados verticales y
- La superficie de la meseta en la que la disolución ha cortado numerosos pozos pequeños.

La Isla de Mona recibe a los vientos alisios del este durante todo el año. Sin embargo, su ubicación al oeste de Puerto Rico permite el paso de una mayor cantidad de frentes fríos, lo cual probablemente es el motivo de que haya una precipitación mayor durante el invierno, en comparación con la isla principal (Calvesbert 1973). La zona de vida de la isla es de bosque seco subtropical sensu Holdridge (1967).

Se cree que la Isla de Mona nunca estuvo unida a ninguna otra masa terrestre; por lo cual los nueve taxones de la herpetofauna de Mona son endémicas: *Eleutherodactylus monensis*, el Coquí de la Mona; *Monachelys monensis*, una tortuga extinta; *Sphaerodactylus monensis*, el Gecko de la Mona; *Anolis monensis*, el Lagartijo de la Mona; *Cyclura cornuta stejnegeri*, la Iguana de la Mona, en peligro de extinción; *Ameiva exsul alboguttata*, la salamanquita de la Mona; *Typhlops monensis*, la Víbora de la Mona; *Epicrates monensis monensis*, la Boa de la Mona; y *Alsophis portoricensis variegatus*, la Culebra de la Mona. La fauna invertebrada macroscópica de las cavidades de Mona incluye: 46 especies no accidentales, 25 especies conocidas por su nombre, 2 troglobiontes endémicos, 1 troglobionte adicional, 3 trogófilas endémicas, 34 troglófilas y 16 ácaros guanófilos (Peck y Kukalova Peck 1981). La Isla de Mona alberga más especies de animales endémicos que todas las demás islas que componen el archipiélago de Puerto Rico en su conjunto, incluyendo Vieques y Culebra, pero no la isla grande (Raffaele 1973). Las aves también constituyen un componente importante de la ecología de la Isla de Mona. Miles de aves marinas, tales como el Rabijunco Coliblanco, las Bobas, y la Tijereta, anidan en la Isla de Mona (Raffaele 1973). La Isla de Mona es un refugio de vida silvestre administrado por el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico.

La vegetación de la Isla de Mona se asemeja a la de otros bosques secos subtropicales de Puerto Rico y la República Dominicana (Calvesbert 1973, Woodbury 1973). Un bosque de dosel bajo y abierto dominado por árboles pequeños y arbustos cubre la mayor parte de la isla. A pesar de su clima seco y su tamaño reducido, la Isla de Mona muestra una gran diversidad de comunidades de plantas. Al cartografiar la vegetación de la isla, Cintrón y Rogers (1991) reconocieron 10 asociaciones distintas de plantas. Donde las condiciones o perturbaciones naturales son severas, se desarrolla un bosque de cacto. En los suelos más profundos, en los sumideros y en las depresiones, se encuentran árboles altos y grandes (Cintrón 1979). Los bosques mejor desarrollados de la Isla de Mona quedan al pie de los farallones hacia el oeste, donde los suelos más húmedos y profundos están protegidos del viento y el salitre (Rogers 1974). Aproximadamente el 11 por ciento de la flora de la Isla de Mona es rara o está en peligro de extinción (Woodbury 1973). Esta vegetación ha sufrido un gran impacto debido a la presencia de cerdos y cabras que se han introducido. La mayor parte del daño a la vegetación causado por estas especies foráneas se debe al consumo de la corteza y las raíces (Cintrón 1979). Los cerdos y las cabras también tienen un efecto en la vida silvestre, como en el caso de la Iguana de Isla de Mona, en peligro de extinción, y la Boa de Isla de Mona (*Epicrates monensis*) (Ruiz y Chabert 1989).

Existen numerosas cavidades en la Isla de Mona, que fueron usadas históricamente por Amerindios. Un yacimiento taíno en la Isla de Mona data de 360 ± 60 años antes del presente, lo cual coincide con el primer contacto entre la población taína y la europea (Frank 1998a). La isla fue explotada por sus abundantes depósitos de fosforita, un material granulado derivado del guano de los murciélagos y compuesto mayormente por fosfato de calcio (Aron 1973). Este guano se usó como abono de fosfato. Durante varias décadas, se libraron batallas por el control de los depósitos de guano de la Isla de Mona (Arana Soto 1969). La primera concesión oficial para la extracción de guano de la Isla de Mona se otorgó en 1871 a un inglés de nombre Jackson Hughes (Wadsworth 1973). El guano se extrajo de la isla hasta mediados de la década del 1920, cuando la Mona Island Phosphate Company vendió su franquicia a la Chatham Coal & Coke Company de Savannah, Georgia; pero al parecer esta empresa nunca extrajo guano de la Mona (Wadsworth 1973). Hoy día, la historia de la minería en la isla se puede reconstruir a base de las reliquias encontradas en sus cuevas (Frank 1998b).

Su ubicación remota y la dificultad de acceso son las razones principales por las cuales la Isla de Mona ha sobrevivido la presión humana. Las playas arenosas son muy limitadas y actualmente el acceso a la isla está restringido a dos playas: Sardinera y Pájaros. La Isla de Mona no tiene agua superficial y los recursos de agua dulce se limitan a unos pocos pozos y la lluvia. La isla tiene un lente de agua dulce al extremo sur de la isla, que alcanza un grosor de 20 m (Richards y otros 1998). Debido a las diferencias en la conductividad hidráulica, el lente de agua dulce no es radialmente simétrico con respecto a la geografía de la isla. El agua subterránea varía de salobre con sulfatos a oxigenado y salobre (Wicks y Troester 1998). Cintrón y otros (1978) encontraron que el manglar en el interior de la Isla de Mona era de una altura mayor de la esperada porque sustraía agua dulce del lente debajo de su substrato.

La isla es un lugar importante de anidaje para las tortugas marinas en peligro de extinción. El Tinglar (*Dermochelys coriacea*), la Cabezona (*Caretta caretta*), el Carey de Concha (*Eretmochelys imbricata*) y la Tortuga Verde (*Chelonia mydas*) suelen anidar en las prístinas aguas de esta hermosa isla. Las playas de anidaje de la Isla de Mona son de los pocos lugares idóneos de anidaje que quedan en el mundo (Wiewand 1973). Con el cambio de soberanía en 1898, la Isla de Mona se anunciaba en los periódicos de Estados Unidos como: "Mona, una exquisita isla tropical de 10,000 acres", "La Perla de las Antillas", "un lugar donde anidan miles de tortugas verdes y rodeada de aguas repletas de las variedades más exquisitas de pescado" (*Boston Globe*, lunes, 13 de marzo de 1899, citado por Wadsworth 1973). Sin embargo, la intensa explotación de los recursos de guano y la pequeña, pero constante, habitación humana tuvieron como resultado la introducción de muchas especies foráneas, lo cual afectó de manera negativa la vida silvestre. Las cabras, los gatos, los cerdos y las ratas son algunos de los animales foráneos más destructivos que existen en la Isla de Mona. También se ha visto afectada la Iguana de Mona por la introducción de árboles foráneos, tales como el pino australiano (*Casuarina equisetifolia*) y la caoba (*Swietenia mahagoni*) (Wiewand 1973). A pesar de estos obvios efectos humanos, los recursos naturales de la Isla de Mona aún son de los mejores conservados del Caribe. Sus maravillas naturales y su flora y fauna única han redundado en que muchas personas se refieran a la Isla de Mona como "la Galápagos del Caribe".

continuación de la página 3

calizas de la costa sur, según se define en el mapa de Monroe. La caliza dispersa incluye todas las formaciones lenticulares de caliza en el centro de la isla y las que no se incluyen en las calizas del Norte y del Sur. La franja kárstica que presenta rasgos superficiales kársticos más desarrollados se encuentra en la zona caliza del Norte (foto 1).

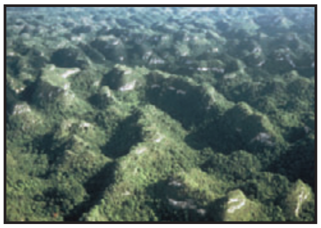

Foto 1. Vista aérea de la franja kárstica, cerca de Arecibo, Puerto Rico. Foto de J. Colón.

Los paisajes kársticos incluyen todas las formaciones producidas por el proceso de **disolución**, en el que se disuelve el lecho rocoso mediante reacciones químicas; un proceso predominante entre los mecanismos de formación topográfica en las regiones kársticas (White 1988). Hay una variedad de criterios de clasificación de las formaciones kársticas y Puerto Rico tiene ejemplos de la mayoría de los tipos de formaciones kársticas ilustrados en el recuadro 2. Reconocemos que existen formaciones kársticas fuera de la franja kárstica, según definida en este trabajo. De hecho, las formaciones kársticas se pueden desarrollar en cualquier momento, aún cuando la caliza este enterrada, puesto que puede haber disolución subterránea en tierras donde no sea aparente la presencia de la caliza. Se entiende que unos 50 millones de kilómetros cuadrados del planeta, es decir, el 20 por ciento de la superficie de la Tierra, son terrenos de **roca karstificable**, y un 15 por ciento de los estados contiguos de los Estados Unidos tienen karso templado (Peck y otros 1988). En Puerto Rico, la región caliza cubre unas 244,285 ha, un 27.5 por ciento de la Isla (tabla 2).

La diferencia principal entre la zona caliza del Norte y la zona caliza del Sur es el clima. La zona caliza del Norte y gran parte de la caliza dispersa se caracterizan como zonas de vida húmedas y muy húmedas (sensu Holdridge 1967), mientras que la zona caliza del Sur se

Tabla 2. El área (ha) de la región caliza de Puerto Rico, subdividida según factores geográficos, climáticos, geoclimáticos, de cubierta terrestre, cubierta urbana y calidad de suelo. Estas áreas corresponden a los mapas en las figuras 3, 4, 5, 32 y 33. Los espacios vacíos significan que la unidad no se encuentra en esa región en particular. 'Propuesta' se refiere a los terrenos que se recomienda que deben ser de dominio público. Para propósitos de comparación, el área de la isla principal de Puerto Rico es de 871,336 ha (tabla 1).

Unidades	**Franja Kárstica**	**Caliza Del Norte**	**Caliza Del Sur**	**Caliza Dispersa**	**Región Caliza**	**Propuesta**
Área Total	142544	218692	21022	4571	244285	39064
Zona de Vida Subtropical						
Bosque seco			16763	388	17151	
Bosque húmedo	135820	206271	4258	3766	214295	36198
Bosque muy húmedo	6660	10748		398	11146	2864
Bosque muy húmedo montano bajo				19	19	
Zona Geoclimática						
Aluvial seca			670	28	698	
Aluvial húmeda	31233	85174	38	179	85391	1616
Aluvial muy húmeda	143	626		1	627	71
Caliza seca			14764		14764	
Caliza húmeda	102967	107025	2973	163	110161	34371
Caliza muy húmeda	6120	6384			6384	2465
Bosque seco, substrato no carbonatado			66		66	
Bosque húmedo, substrato no carbonatado	1254	7462		3	7465	115
Bosque muy húmedo, substrato no carbonatado	228	2034		55	2089	187
Volcánico-clástico extrusivo seco			1029	360	1389	
Volcánico-clástico extrusivo, húmedo	366	5229	1238	3302	9769	95
Volcánico-clástico extrusivo, muy húmedo	168	1084		337	1421	129
Volcánico-clástico extrusivo, húmedo montano bajo				19	19	
Intrusivo seco			203		203	
Intrusivo húmedo		1381	9	119	1509	
Intrusivo muy húmedo	1	620		5	625	12
Seco ultramáfico			31		31	
Agua	64	1673	1		1674	2
Cubierta Terrestre — 1977-78						
Agrícola	11570	29078	525	774	30377	772
Pastizal	45662	64313	2650	1455	68418	3819
Bosque de dosel muy tupido	845	1042	12	64	1118	436
Bosque de dosel tupido	59273	63277	12050	1068	76395	31734
Bosque de dosel abierto	98	121	201	7	329	6
Matorral	9337	12880	4037	687	17604	1630
Manglar	41	2911	58		2969	
Humedales y salinas	88	2622	10		2632	3
Zonas rocosas	55	98	4		102	
Cuerpos de agua	480	3030	72	35	3137	171
Desarrollo, no productivo	15095	38773	1403	481	40657	493*
Sin clasificar		547			547	
Cubierta urbana — 1977-78	14556	36085	1362	402	37849	493*
Cubierta urbana — 1994	19272	43881	2176	509	46566	597*
Suelos						
Aptos para la agricultura	39830	65411	1837	390	67638	3038
No aptos para la agricultura	102714	153281	19185	4181	176647	36026

*Estos terrenos están dentro de la zona propuesta, pero se excluirían de los planes de adquisición.

Recuadro 2. Clasificación de los paisajes del karso (White 1988).

Tipos Comunes

Karso de dolina — paisaje con muchos sumideros.

Karso de gallera — una alta proporción de dolina por área pero con una densidad menor de depresiones que en el karso de dolina.

Karso de conos y torres — una topografía kárstica muy común en el trópico, caracterizada por muchas lomas de laderas empinadas, rodeadas de depresiones en forma de estrella (figura B2-1).

Fluviokarso — un paisaje de drenaje irregular, valles cegados, grietas acuíferas, manantiales grandes, depresiones cerradas y cavidades.

Karso de pavimento — áreas de caliza expuesta, por lo general esculpida en diversos tipos de **karren**.

Karso de polje — poljes alternados con cordilleras intermedias.

Karso de laberinto — Paisaje dominado por corredores y cañones de disolución que se intersectan.

Karso de cavidad — donde hay cavidades y un drenaje subterráneo bien desarrollado con poca expresión de depresiones cerradas u otras formas kársticas.

Clasificación Según la Cubierta

Karso cubierto —la superficie disuelta del lecho está cubierta con distintos materiales, suelos o roca.
- Karso subsuperficial —cubierto de suelo.
- Karso de manto —cubierto de roca **alóctona** o sedimentos. Parte del paisaje contemporáneo y más antiguo que la cubierta.
- Karso enterrado —cubierto de roca o sedimento alóctono. No es parte del paisaje actual y es más antiguo que su cubierta.
- Karso intercalado —cubierto de roca o sedimento alóctono. Puede ser parte o no del paisaje contemporáneo y puede ser más reciente que su cubierta.
- Karso subacuático —karso cubierto debido a un aumento en el nivel del mar: karso subfluvial, debajo de un río; karso submarino, debajo de los niveles de marea, tanto pleamar como bajamar.

Karso expuesto —roca superficial expuesta.
- Karso desnudo —desarrollado y mantenido sin cubierta o debajo de cubierta temporal de nieve o agua.
- Karso denudado —karso subsuperficial o intercalado expuesto debido a la erosión de su cubierta.
- Karso exhumado —karso de manto que ha sido desprovisto de su cubierta por la erosión.
- Karso relicto —los restos topográficos o físicos de karso que aún no han sido cubiertos y de los cuales se ha removido la mayor parte de la roca kárstica por medio de la erosión.

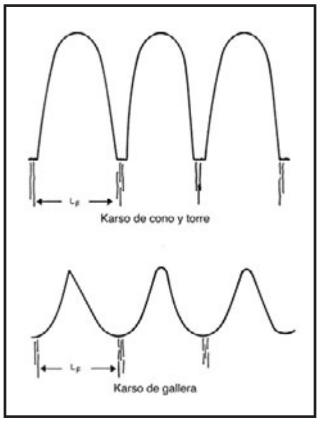

Figura B2-1. Vista idealizada de la distinción entre el karso de conos, el karso de torre y el karso de gallera, basado en el declive de las laderas. L_F representa el espacio entre las fisuras (White 1988).

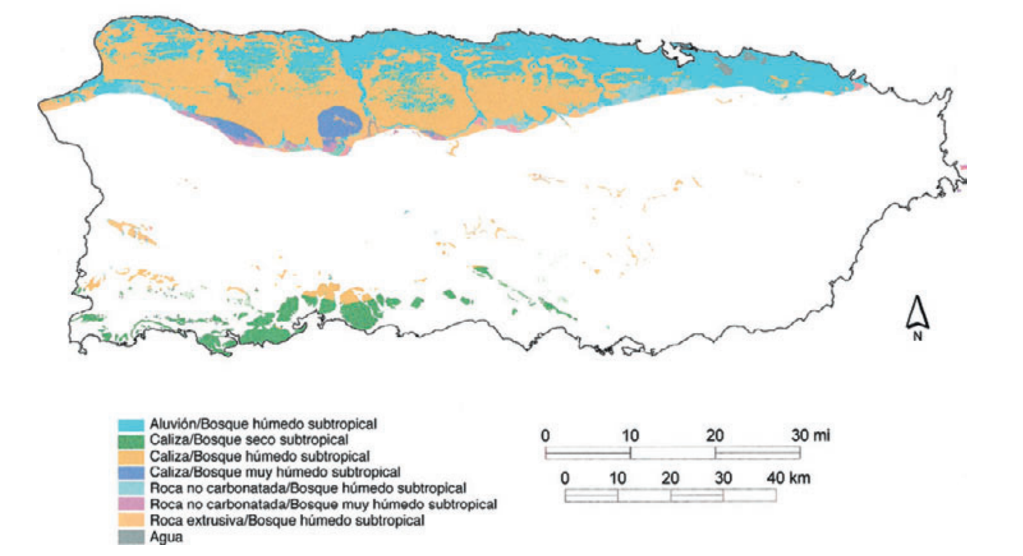

Figura 4. Mapa geoclimático de la región caliza de Puerto Rico. La zona caliza del Norte está ubicada principalmente en la zona de vida de bosque húmedo (*sensu* Holdridge 1967) con una reducida representación de la zona de vida de bosque muy húmedo. La zona caliza del Sur queda principalmente en una zona de vida de bosque seco con alguna representación de zona de vida de bosque húmedo.

caracteriza como una zona de vida seca (figura 4). Encontramos 4 zonas de vida representadas en la región caliza, pero el 88 por ciento de la región está en la zona de vida de bosque húmedo (tabla 2). Aproximadamente un 7 por ciento de la región caliza queda en la zona de vida de bosque seco y un 4.6 por ciento queda en la zona de vida de bosque muy húmedo. Una reducida área de caliza dispersa queda en la zona de vida de bosque muy húmedo premontano. Las diferencias climatológicas redundan en ritmos distintos de **karstificación** (recuadro 3) y por lo tanto, en distintos rasgos topográficos. Además, la naturaleza del substrato, el ambiente de deposición y la **diagénesis** también contribuyen a las diferencias entre las topografías de la zona caliza del Norte y la zona caliza del Sur. Nos concentraremos en la zona caliza del Norte y la franja kárstica en particular, pero haremos referencia a la zona caliza del Sur (recuadros 1 y 4) o a la caliza dispersa, cuando sea apropiado.

La zona caliza del Norte se extiende por unos 140 km de este a oeste por la costa norte con un ancho máximo de 22 km, cerca de Arecibo (Monroe 1976). Abarca un área de 218,692 ha ó 90 por ciento de la región caliza de Puerto Rico (tabla 2). El espesor total de estas formaciones calizas es de aproximadamente 1,400 m (Giusti 1978). La mayor parte de la caliza en los 25 km al extremo oriental de la región está enterrada bajo depósitos aluviales y sólo aflora esporádicamente, de manera que la topografía kárstica es más conspicua al oeste de San Juan y al sur de la planicie costera (figura 3). El área de la franja kárstica es de 142,544 ha (tabla 2), un 65 por ciento de la zona caliza del Norte. La elevación más alta de la franja kárstica es de 530 m sobre el nivel del mar y las escarpas en el límite del sur de la franja suelen elevarse a unos 400 m.

Recuadro 3. Karstificación de la caliza (Monroe 1966, 1976; Román Más y Lee 1987).

La karstificación es el proceso de formación de un tipo de terreno en roca soluble con las formaciones superficiales y subterráneas resultantes de la disolución. De las cuatro ecuaciones químicas que se indican a continuación; el proceso con yeso no se ha documentado para la franja kárstica. Giusti (1978) cartografió el nivel de desarrollo kárstico para la costa norte.

$$CO_2 + H_2O \longleftrightarrow H_2CO_3$$

$$\underset{\text{(calcita)}}{CaCO_3} + H_2CO_3 \longleftrightarrow Ca^{++} + 2HCO_3^{-}$$

$$\underset{\text{(dolomita)}}{CaMg(CO_3)_2} + 2H_2CO_3 \longleftrightarrow Ca^{++} + Mg^{++} + 4HCO^{-}$$

$$\underset{\text{(yeso)}}{CaSO_4.2H_2O} \longleftrightarrow Ca^{++} + SO_4^{=} + 2H_2O$$

Este proceso disolverá la roca caliza cuando se desplaza a la derecha y depositará (precipitará) la caliza cuando se desplaza a la izquierda. La ecuación se desplazará a:

- La derecha en presencia de agua acídica (debido a la presencia de CO_2 o NO_3 o SO_4), conocida como **agua agresiva;**
- La izquierda en presencia de agua alcalina;
- La izquierda si aumenta la temperatura, lo cual causa el escape de CO_2; y
- La izquierda si el agua se evapora, lo cual resulta en el escape del CO_2.

La karstificación comienza con la disolución de la caliza original, compuesta principalmente de organismos marinos. La roca caliza original puede ser sustituida por caliza que ha sido disuelta y reprecipitada debido a la acción del agua subterránea. La caliza que se ha reprecipitado en calcita, por ejemplo, puede rellenar los carapachos de los organismos y formar moldes de su estructura interna y externa luego de disuelto el carapacho. El carbón de origen vegetal ocupa el lugar del carbón de origen marino en la caliza transformada. Luego del cambio o reemplazo, se continúa con la karstificación, tanto mediante la disolución como mediante la reprecipitación.

La disolución es más activa en el ambiente subterráneo, donde el agua acídica llega hasta la caliza enterrada y la lixivía. La disolución es más predominante en las zonas de vida húmedas y muy húmedas y menos predominante en las zonas de vida secas en las cuales se favorece la reprecipitación.

continua en la próxima página

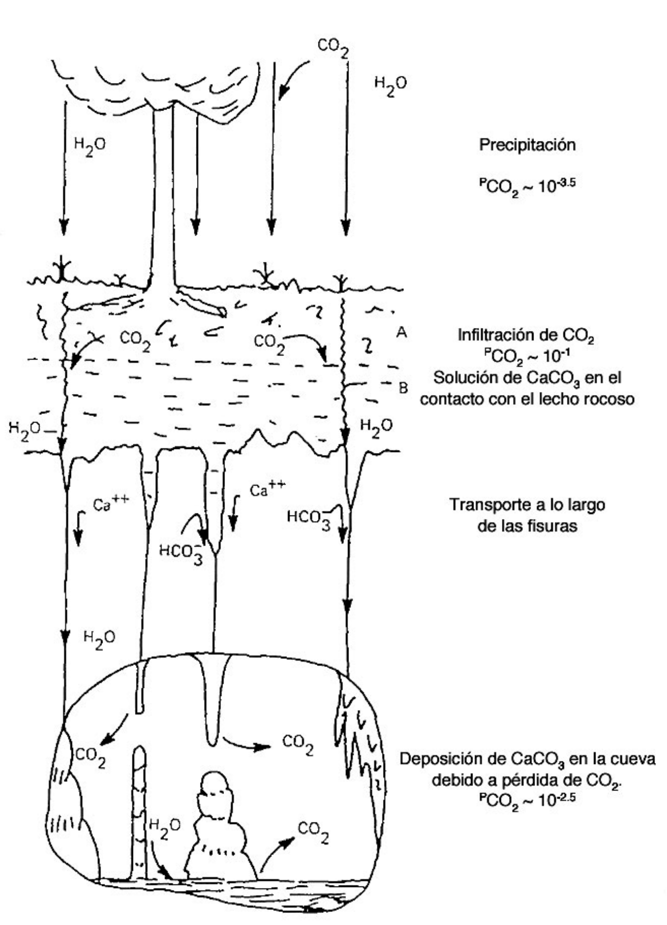

Figura B3-1. Dibujo esquemático del modelo físico de la deposición del espeleotema de calcita (White 1988).

Recuadro 3. *continuación de la página 7*

La cubierta superficial de plantas acelera estos procesos de disolución porque producen aguas ácidas en la respiración de materia orgánica (figura B3-1). Las depresiones cerradas aparecen como producto de los procesos de disolución. Las depresiones cerradas de menor tamaño van aumentando de profundidad a medida que una mayor cantidad de ácido—producto de la respiración de las raíces y los microbios, las sustancias húmicas en el suelo y/o las aguas que se percolan—acelera el proceso. White (1988) identificó tres condiciones que rigen el desarrollo de los paisajes kársticos. En primera instancia, las fuerzas químicas — la temperatura, la precipitación y el pCO_2 ; en segunda instancia, las fuerzas físicas — la precipitación y el relevo y por último, el entorno hidrogeológico que incluye el entorno tectónico, el grosor de la roca soluble y el entorno estratigráfico y litológico.

La caliza agrietada es susceptible a un índice mayor de disolución debido a que las grietas permiten la infiltración del agua ácida. Las grietas se ensanchan con la disolución y se forman redes de pequeñas cavidades de disolución sobre y debajo del nivel freático. Las fracturas en la caliza también pueden resultar en el ensanchamiento mediante la disolución y el desarrollo de sistemas de drenaje (figura B3-2). Los procesos penetrantes de disolución resultan en el drenaje subterráneo y la escasez de corrientes superficiales. La disolución también resulta en bastantes **pozos de infiltración**, o grietas acuíferas; muchas depresiones cerradas; y una red de rasgos menores, tales como crestas suaves y puntiagudas de disolución, de bajo relieve, en la superficie de la caliza.

La disolución de la caliza - es decir, la meteorización o el desgaste químico - es más lenta que la erosión del suelo y por lo tanto, las lomas calizas se levantan con relación a sus valles con una cubierta de depósitos de manto en constante erosión. Las pendientes calizas karstificadas tienden a ser casi verticales.

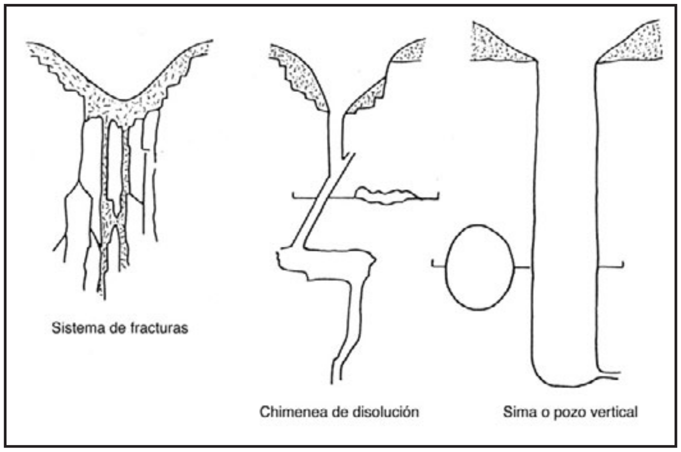

Figura B3-2. Tres desarrollos de sistemas de drenaje en las depresiones cerradas: una zona de fisura ensanchada por disolución con suficiente permeabilidad para permitir el transporte de suelo al nivel subsuperficial; una chimenea de disolución, en esencia una cueva vertical desarrollada mediante la selección de un solo trayecto en el sistema de fisuras; y un pozo vertical, como la entrada de Empalme del sistema del río Camuy (White 1988).

Foto 2. Río Grande de Arecibo desde Cueva Ventana, Arecibo, Puerto Rico. Foto de L. Miranda Castro.

La Franja Kárstica es Espectacular

El karso puertorriqueño es espectacular. Constituye una zona silvestre[3], con gran diversidad de formaciones, topografía accidentada, paisajes singulares y panoramas de contrastes (foto 2).

Zona Silvestre

"El Cerro Atalaya es una de las regiones menos accesibles de Puerto Rico. Ni una sola carretera atraviesa la región y sólo unas pocas la bordean. Su actividad económica es muy limitada. De hecho, hay un marcado contraste entre esta área subdesarrollada y las áreas prósperas adyacentes".

Picó (1950, p. 149).

Puerto Rico es una isla urbana con una densidad poblacional promedio de más de 425 personas/km^2. La isla ha experimentado un ritmo acelerado de deforestación. En la década de 1940, la cubierta forestal de la Isla bajó a un 6 por ciento, con una cantidad aproximadamente igual de café de sombra (Birdsey y Weaver 1982, 1987); en 1990, la cubierta forestal era de aproximadamente un 32 por ciento (Franco y otros 1997). La franja kárstica es similar al resto de la isla en cuanto a la historia del cambio en la cubierta forestal, con dos excepciones. Primero, la población prácticamente ha desistido de la ocupación o del uso del paisaje accidentado de la franja kárstica. La densidad de las carreteras estatales pavimentadas en la franja kárstica es ahora muy baja en comparación con la densidad de carreteras de la isla en general, que es de 2.5 km de carretera por kilómetro cuadrado (Morales Cardona y otros 1994). Segundo, ya para el 1977-1978, la cubierta forestal y de matorrales en la franja kárstica era de un 49 por ciento (tabla 2), mayor que el valor promedio para la isla en general. Muchas áreas de la franja kárstica tienen un 86 por ciento de cubierta forestal o más. Por estas razones, esta parte de Puerto Rico resulta inaccesible y constituye una zona silvestre. Sus bosques llevan más de cinco décadas recuperándose de los usos humanos del pasado y forman un dosel continuo en un área extensa, con muy poca influencia humana. Los bosques kársticos del Norte

[3] El término zona silvestre se usa en el sentido genérico y no en el contexto de la definición legal de la Ley Federal de Zonas Silvestres ("Wilderness Act").

Recuadro 4. La caliza del Sur (Monroe 1976, 1980).

La deposición de roca al sur de Puerto Rico comenzó y terminó antes que en el norte. Las rocas en la zona sur de Puerto Rico están repletas de fisuras mientras que las del norte tienen muy pocas fallas. Los buzamientos se inclinan hacia el sur a unos 10º a 30º. La karstificación de la caliza en las zonas de vida secas no es tan común como en las zonas de vida muy húmedas porque la poca precipitación dilata los niveles de disolución. Además, gran parte de la calizas del Sur están enterradas debajo de profundos depósitos aluviales, que alcanzan una profundidad de hasta 900 m en Santa Isabel.

Las formaciones calizas del Sur son:

- Formación Juana Díaz —Época del Oligoceno y Mioceno. Origen de arrecife coralino. Lechos de base de arena, guijarros y chinos de río, cubiertos de arcilla calcárea arenosa a limosa o arcilla esquistosa. Suprayacente al complejo volcánico del centro de Puerto Rico. Contiene varias cavidades grandes y depresiones cerradas. En la superficie del suelo se forma el **caliche**.
- Caliza Ponce —Época del Mioceno. Origen de arrecife coralino. Muy fosilífero. Contiene **cuevas de refugio** en riscos verticales y pocas cavidades. Se forma caliche.
- Formación Guanajibo —Mioceno tardío, posiblemente Plioceno. Pequeños afloramientos de caliza amarilla fosilífera, casi completamente meteorizada hasta limo compacto, arena y grava.
- Caliza Parguera —Cretáceo temprano.

Las formaciones calizas de las islas adyacentes incluyen:

- Caliza Isla de Mona —Terciario medio. Numerosas cuevas.
- Caliza Lirio —Caliza pálida de cristalización fina. Data desde el Mioceno tardío al Plioceno temprano. Grosor máximo de 40m cerca de Playa Sardinera en Isla de Mona. Moderadamente fosilífero con grandes acumulaciones de cabezos coralinos y arrecifes de parche cerca de la Cueva del Capitán y Cueva Centro. Contiene karstificación extensa con cuevas, karren, sumideros, pozos y grietas extendidas por la superficie de la meseta (Frank y otros 1998a).

Foto 3. La actividad humana cerca de la franja kárstica se concentra en la planicie aluvial. Foto de J. Colón.

constituyen la extensión más grande de cubierta forestal continua de la isla. Debido al poco impacto humano en estos bosques, la franja kárstica puertorriqueña alberga algunos de los bosques kársticos menos intervenidos del Caribe.

La actividad humana en la zona caliza del Norte se limita casi exclusivamente a la planicie aluvial costera entre Loíza y Arecibo y la planicie no aluvial entre Arecibo y Aguadilla (foto 3). Como resultado de los patrones de uso de las tierras, la tierras del karso al sur de la planicie costera están cubiertas en más de 86 por ciento por bosques (figura 5). Hasta la década de 1980 no había un solo pueblo ubicado en la línea del oeste hacia el este en la topografía accidentada del karso desde Aguadilla a Toa Alta, una distancia de unos 100 km. Con la excepción del pequeño pueblo de Florida, los poblados quedan justo al norte o al sur de los límites de la franja kárstica. Más aún, muchos de los habitantes de los pueblos en el límite sur de la franja kárstica proveían la mano de obra para actividades económicas fuera de la franja kárstica (Picó 1950).

La diversidad y los tipos de formaciones en la franja kárstica llevaron a Monroe (1976) a declarar que la región es "una zona silvestre de formaciones kársticas". Esta idea fue elaborada por White (1988), quien expuso que las cavidades y el drenaje subterráneo constituían una zona silvestre a la misma escala que los paisajes tradicionales de zonas silvestres. Aún en las zonas urbanas, las cavidades

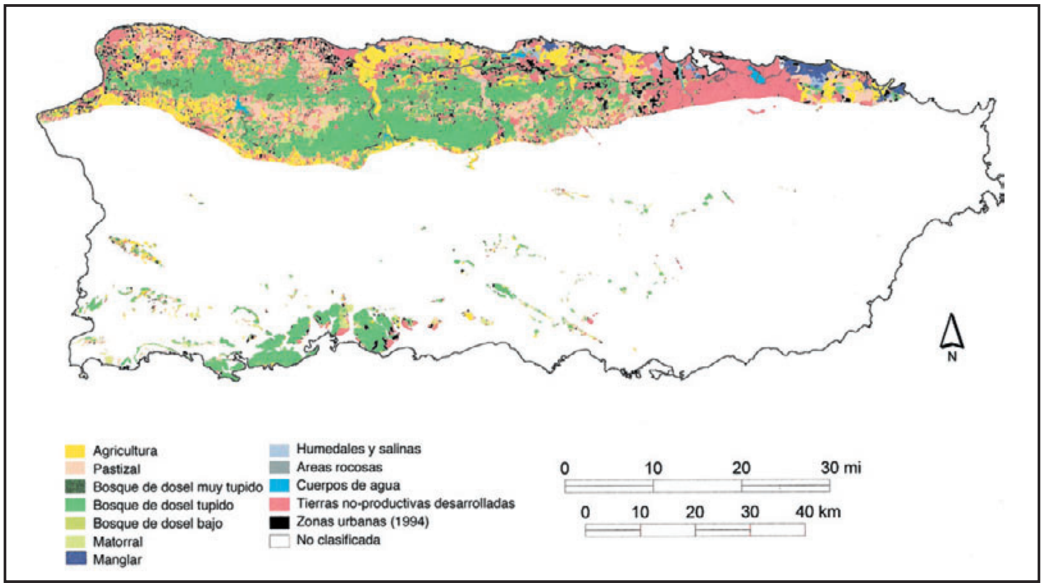

Figura 5. Mapa de la región caliza con la cubierta de los tipos de usos de terreno para el año 1977- 1978 (modificada de Ramos y Lugo 1994). Se observa la alta proporción de bosque de dosel tupido en el área propuesta de la franja kárstica y en el área de Guánica en la caliza del Sur.

Foto 4. La espeleología en la franja kárstica es una experiencia única en un paisaje silvestre. Estos exploradores están dentro del Sistema de Cavernas del río Camuy. Foto de K. Downy.

Recuadro 5. La escarpa de la Cuesta Lares, según descrita por Monroe (1976, p. 19).

"El rasgo particular más prominente del karso de [Puerto Rico] es la escarpa de la Cuesta Lares, que se extiende de manera continua desde San Sebastián a Corozal, interrumpida únicamente por los valles aluviales de los ríos principales que atraviesan la franja. La escarpa es primordialmente el resultado de la erosión desigual de la Formación San Sebastián, la cual es muy susceptible a la meteorización y la erosión, y de la roca volcánica subyacente hacia el sur, y de la caliza suprayacente y hacia el norte, la cual es mucho más resistente. También, es el resultado de los grandes derrumbes que han creado riscos muy empinados, al desprenderse grandes bloques de roca caliza y socavarse el material subyacente de cimiento debido al arroyamiento y la escorrentía laminar y así como la arcilla de la Formación San Sebastián se anega y forma una superficie deslizante.

La altura en la parte superior de la escarpa varía desde un máximo de unos 530 m cerca de Caguana entre el río Tanamá y el río Grande de Arecibo hasta un mínimo de unos 200 m cerca de Corozal al este y cerca de Moca y San Sebastián al oeste. La altura relativa de la escarpa varía, sin embargo, según la profundidad del cauce de la corriente que lo bordea, de modo que la parte más empinada y relativamente alta de la escarpa es la que queda justo al oeste del lago Dos Bocas, donde el nivel del lago es de unos 90 m y la cima de la escarpa es de unos 430 m, una diferencia de altura de unos 340 m. En contraste, en la zona justo al oeste, cerca de Caguana, donde la Formación San Sebastián aflora en una meseta escasamente erosionada a una altura de aproximadamente 430 m, la cima de la escarpa llega solo a unos 480 m, una diferencia de sólo 50 m. Esta última cifra representa lo que se podría considerar una erosión diferencial, que no se ha complicado con derrumbes provocados por corrientes de rápida incisión".

pueden ser zonas silvestres de la misma categoría que las remotas extensiones de montañas y bosques lejos de la civilización humana. La topografía subterránea, con su oscuridad total y formas extrañas de rocas y depósitos minerales, es igualmente exótica para las personas en comparación con los paisajes tan conocidos de la superficie (foto 4). La espeleología es una forma genuina de experimentar una zona silvestre y requiere soledad, un ritmo tranquilo y un sentido de absorción en el ambiente, al igual que la experiencia que se tiene en la montaña o en el bosque (White 1988).

En fin, la franja kárstica se considera una zona silvestre desde tres puntos de vista. Primero, el bajo nivel de influencia humana y la vasta extensión de bosque maduro de dosel cerrado (en función de la escala de las islas caribeñas). Segundo, incluye formaciones kársticas de gran diversidad y magnitud igualadas en pocos lugares en el mundo. Y tercero, comprende una gran extensión de ríos subterráneos, acuíferos y cavidades de extraordinario tamaño y belleza.

Diversidad Topográfica

"Las formaciones desarrolladas en las calizas de las zonas costeras del norte de Puerto Rico constituyen uno de los ejemplos más destacados del karso tropical en el mundo".
Giusti y Bennett (1976, p. 4).

Holokarso es un término que se usa para describir formaciones con drenaje y topografía kárstica completa. Estas formaciones son muy escasas y las pocas regiones del mundo donde ocurre el holokarso incluyen el Adriático y el Caribe (White 1988). Cuando existe una mezcla de formaciones kársticas y características fluviales, la región se denomina ***fluviokarso***. La franja kárstica de Puerto Rico contiene ambos tipos de formaciones muy cercas unas de las otras.

La variedad de formaciones en la franja kárstica es notable, producto del tipo de roca y el clima. Por ejemplo, la franja kárstica del norte, que varía de húmeda a muy húmeda, se divide a su vez en varios cuerpos lenticulares de topografía muy similar a la litología de la roca subyacente (Monroe 1976). Estas rocas varían en cuanto a su susceptibilidad a la erosión y se inclinan generalmente hacia el norte entre 1º cerca del Océano Atlántico y 5º por el sur. Las **cuestas** son las formaciones que resultan de la inclinación o buzamiento de la roca subyacente y su susceptibilidad desigual a la erosión. Se caracterizan por las escarpas orientadas hacia el sur (recuadro 5) y un declive largo y menos pronunciando al lado norte, comúnmente ocultadas e interrumpidas por una gama fenomenal de rasgos de solución tales como las **depresiones cerradas**, también conocidas como **sumideros** o "**dolinas**" (Monroe 1976).

La formación denominada la Cuesta de Aguada tiene la escarpa más extensa de la franja kárstica (Monroe 1976). Se extiende de manera continua, interrumpida por los valles de los ríos, desde el oeste de San Juan hasta la costa occidental en Aguadilla. Se pueden observar remanentes de la escarpa hacia el este hasta Loíza en ambas riberas del río Grande de Loíza. En el límite sur del cuadrángulo de Camuy, la escarpa forma un muro de unos 50 m de alto en los terrenos más altos, al este y al oeste del valle del río Camuy.

Los acantilados del río Guajataca son espectaculares muros de caliza que bordean

Foto 5. Cañón del río Guajataca. Foto de L. Miranda Castro.

los cañones, que en la ribera occidental del río a unos 3 km de su desembocadura alcanzan 165 m de alto (figura 6, foto 5). El río fluye 155 m por debajo de la cima de los acantilados. La pendiente al lado oeste del acantilado baja a la arena de manto a unos 15 a 30 m debajo de su cima, creando en efecto un muro entre la planicie hacia el oeste y el cañón del río al este (Monroe 1976).

El Sumidero Tres Pueblos (foto 6) es la formación por colapso más grande de Puerto Rico (Monroe 1976). Consta de un pozo escarpado de más de 120 m de profundidad y 140 m de diámetro. El río Camuy fluye hacia esta depresión y emana de ella. Otros rasgos geomorfológicos notables de la franja kárstica, algunos de los cuales se describen más adelante, incluyen las **galleras**, lomas cónicas o **karso cónico**, **valles secos**, cavidades y ríos subterráneos, puentes de piedra, **torres** o **mogotes**, **karso de mogote o de torre**, **karso de cuesta**, valles anchos, **zanjones** y muchas otras formaciones kársticas menores tales como el **karren** de agujas. En la zona kárstica del Sur ocurren ventanas naturales y al suroeste de Mayagüez hay un ejemplar excelente de karren tropical de pináculos, cuyos picos alcanzan una altura de 2 a 3 m. Este tipo de karren es la forma que comprendemos menos (White 1988).

Topografía Accidentada

“La topografía de estas franjas es tan accidentada que muchas zonas están totalmente deshabitadas y carecen de carreteras o veredas; una notable excepción para la densamente poblada isla de Puerto Rico.”

Picó (1950, p. 147).

Foto 6. Sumidero de Tres Pueblos. Foto de A. E. Lugo.

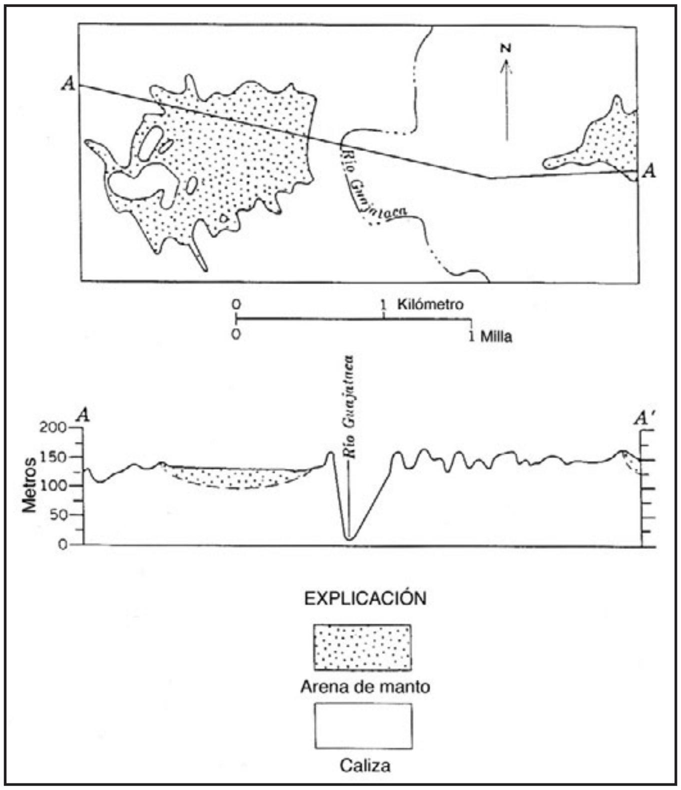

Figura 6. Mapa y perfil de la relación entre el acantilado del río Guajataca, el cañón y la planicie cubierta por arena de manto (Monroe 1976).

La karstificación en Puerto Rico, dado su clima y tipos de roca, causa que los declives sean casi verticales, lo cual resulta en una topografía escarpada. La densa concentración de mogotes, galleras y lomas cónicas, todas caracterizadas por pendientes muy empinadas, le dan una apariencia corrugada al paisaje del karso. Sólo se puede atravesar el karso por los valles entre las lomas, pero aún esos valles a veces no tienen salida. Con frecuencia las pendientes escarpadas están formadas de un manto de caliza endurecida depositada sobre un material más blando que cede cuando se le recarga con objetos pesados, lo que dificulta la travesía en este terreno.

Monroe (1976, p. 21) describió la topografía accidentada de la franja kárstica: “Al norte de la escarpa [de Aguada], la cuesta es una topografía kárstica sumamente accidentada caracterizada por una variedad de **tipos de karso**, sobre todo el **karso de dolina** en el cuadrángulo de Manatí y por la abundancia de valles similares al **polje y uvalas** en otras áreas. En unos pocos lugares, el karso es de conos, muy similar al que se formó en la Caliza Lares, pero más caracterizado por una superficie de dolinas de disolución profunda, separadas por estrías redondeadas, que forman un declive irregular hacia el norte al muro interrumpido de la escarpa Aymamón. La parte norte de la zona, caracterizada por dolinas profundas de solución y hundimiento en la caliza Aguada y separadas por torres altas cubiertas por caliza

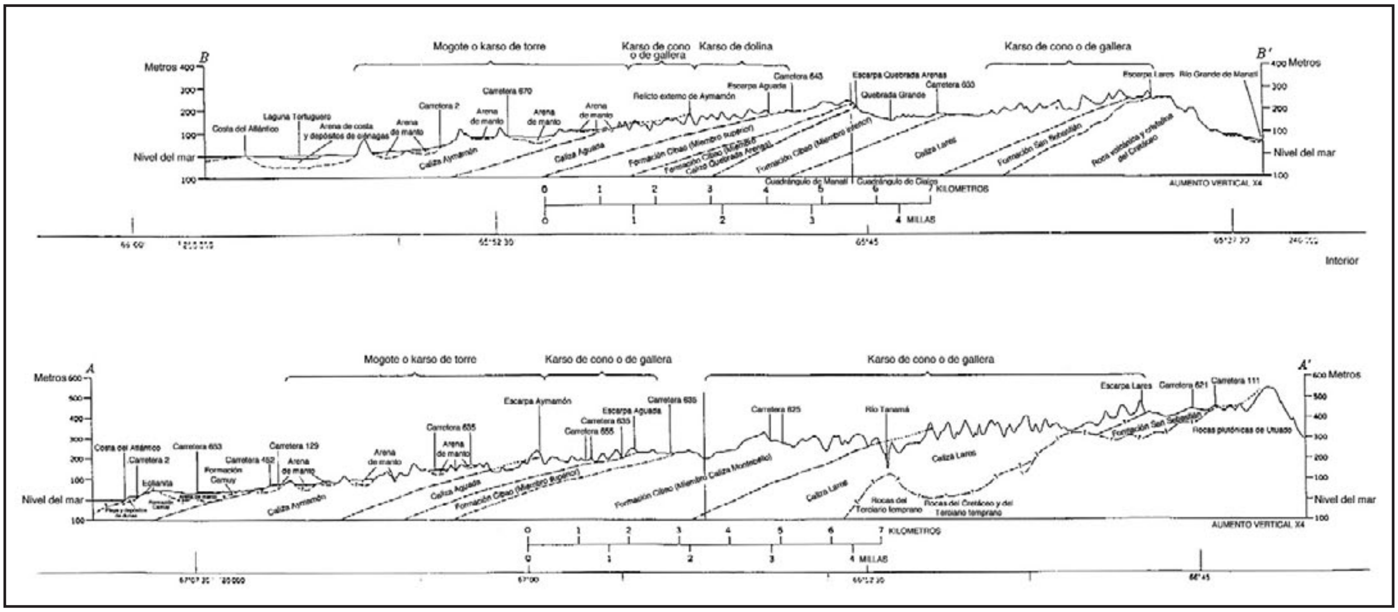

Figura 7. Cortes transversales topográficos y geológicos, en dirección norte-sur, de la franja kárstica (Monroe 1976). Los cortes destacan los rasgos del paisaje - tanto antropogénicos como naturales - y las formas geológicas subyacentes. Las llaves clasifican los rasgos generales de los cortes. La ubicación de los cortes se indica en la figura 3.

Aymamón, es el área más accidentada de toda la franja kárstica. En el cuadrángulo de Quebradillas, muchas de las dolinas tienen 70 m de profundidad más que en el punto más bajo de sus bordes, y las torres adyacentes cubiertas por caliza Aymamón se levantan unos 50 m más alto. Unos pocos caminos de caballo y veredas atraviesan esta zona, pero las pendientes casi verticales dificultan la travesía. Las carreteras de interconexión en el pasado han seguido los valles más anchos del sistema, pero la Autoridad de Carreteras de Puerto Rico actualmente comienza a construir carreteras serpenteadas por las partes más accidentadas del karso, en general, siguiendo los caminos de caballo más amplios".

Paisajes Singulares

En Puerto Rico y en muy pocos otros lugares en el mundo se encuentran paisajes como los formados por el karso de cuestas, conos, torres y dolinas (figura 7). Los paisajes dominados por zanjones - conjuntos de largas trincheras paralelas de varios metros de profundidad - existen únicamente en la franja kárstica de Puerto Rico (Monroe 1976). Los cañones de los ríos en la franja kárstica son espectaculares. Un ejemplo es el cañón del río Grande de Arecibo (foto 7), que atraviesa el karso con ancho entre 800 a 1,200 m y con muros casi verticales que llegan hasta 200 m de alto (Monroe 1976). Este río ha depositado más de 70 m de suelo aluvial sobre la roca caliza. El río Guajataca tiene cañones con escarpas que llegan a alturas de 150 m. La planicie costera cerca del río Grande de Manatí es notable porque sus meandros están sumamente bien desarrollados. En la costa, los farallones, las dunas de arena y los extensos humedales ribereños y de cuenca, de los más grandes de la isla, dominan el paisaje.

Panoramas de Contrastes

Los paisajes de la franja kárstica son un ejemplo de porqué Puerto Rico es una isla de contrastes. La región contiene una multiplicidad asombrosa de rasgos y formaciones topográficas en un área muy reducida. En menos de una hora de viaje en automóvil, se puede experimentar y disfrutar de una gama increíble de panoramas contrastantes.

El observador se puede concentrar en la densidad de lomas accidentadas que se desvanecen en la distancia o en los gigantescos acantilados de los ríos que atraviesan el paisaje. En la costa, puede disfrutar de los farallones u observar el mar embravecido que golpea las enormes dunas

Foto 7. El cañón del río Grande de Arecibo. Foto de L. Miranda Castro.

Foto 8. Delta del río Grande de Arecibo. Foto de J. Colón.

Foto 9. Cueva Larga. Foto de la Fundación de Investigaciones Espeleológicas del Karso Puertorriqueño.

de arena. Los extensos valles fluviales con sus vastas praderas verdes y el serpenteado río Grande de Manatí o el río Grande de Arecibo ofrecen otros paisajes con los cuales solazarse (foto 8). Estos ríos llevan al observador a los amplios estuarios o a las ciénagas y lagunas costeras, o puede contemplar las profundas depresiones en la tierra hacia donde desaparecen los ríos, caminar por las espectaculares cavidades o flotar en uno de los tres ríos subterráneos conocidos. Gran parte del drenaje de esta región es subterráneo, aunque miles de manantiales y **rezumaderos** brotan de las fisuras de las rocas y forman hermosas cascadas. Algunas de las cavidades más espectaculares del mundo están abiertas a la exploración (foto 9). Éstas incluyen el sistema de **cavidades fluviales** del río Camuy con aproximadamente 17 km de cavidades delineadas en mapas y 16 km de ríos subterráneos y el sistema del río Encantado, el río subterráneo atravesable de manera continua más largo del mundo (Courbon y otros 1989).

Foto 10. La caliza puertorriqueña se originó de arrecifes coralinos antiguos, similares a este arrecife actual de Puerto Rico. Foto de L. Miranda Castro.

La Caliza de la Franja Kárstica Data de Muchas Épocas

Las formaciones calizas en Puerto Rico datan desde el periodo Cretáceo temprano hasta el Cuaternario, un lapso de 146 millones de años (tabla 3). La roca caliza más antigua está expuesta en la parte oriental de la isla, desde el oeste de Caguas hasta Cidra y Cayey (Monroe 1976). Esta caliza parece haberse originado de los arrecifes coralinos circundantes en las faldas de la isla volcánica (foto 10). También se encuentra caliza del Cretáceo temprano, la Caliza Parguera, en la costa suroeste de la Isla, sobre todo entre Guánica y la costa occidental. La roca caliza en Puerto Rico es de origen marino y ha sufrido poco cambio posdeposicional (Giusti 1978). Luego de que emergiera por encima del nivel del mar, alguna de esta caliza marina original pasó por el proceso de karstificación (recuadro 3) y fue transformada en la roca caliza que se encuentra actualmente en la superficie de la Tierra. La caliza marina originaria del norte se ha observado en una muestra de la Caliza Lares extraída entre 1,129 a 1,136 m debajo de la tierra entre Arecibo y Barceloneta. En la caliza del Sur, se puede observar la caliza marina originaria en los **afloramientos de creta o de tiza** en la Formación Juana Díaz, cerca de Ponce (Monroe 1976).

En la región caliza existen afloramientos con pequeñas cantidades de creta y dolomia, además de grava, arena y arcilla derivadas de la roca volcánica de la montaña (Monroe 1976). El principal desarrollo de caliza en el norte de Puerto Rico data del Oligoceno (hace 34 a 23.5 millones de años) y del Mioceno (hace 23.5 a 5.2 millones de años) (figura 8). La secuencia de las formaciones calizas del tardío a mediano Terciario de la caliza de la costa norte (figura 9) es el producto de varias regresiones y transgresiones menores y mayores del mar que ocurrieron entre el Oligoceno y el Mioceno (Seiglie y Moussa 1984).

continua en la página 16

Tabla 3. Cronograma geológico del **fanerozoico** (Behrensmeyer y otros 1992) con referencia a eventos en Puerto Rico (*) y en otras partes del mundo. Ma significa millones de años transcurridos desde el momento en que se calcula que comenzó el periodo, la época o la era. Se puede calcular la duración de determinado periodo, época o era, restando el momento en que comenzó del momento en que comenzó el siguiente periodo, época o era. Ta = tardío, Me = medio y Te = temprano.

Era		Periodo	Ma	Época	Ma		Sucesos
CENOZOICO	CUATERNARIO	Antropógenico		Holoceno	0.01		* Los seres humanos (amerindios) comienzan a poblar Puerto Rico; extinción de los mamíferos terrestres Fin del último periodo glaciar. * Puerto Rico asume su forma actual.
CENOZOICO	CUATERNARIO	Antropógenico		Pleistoceno	1.64		* Extinción de los mamíferos terrestres en Puerto Rico entre esta época y la siguiente. * Depósitos superficiales - aluvial, eoliano, pantanos, ciénagas y terrazas. Glaciación – varias ocurren, causando alzas y bajas en el nivel del mar. Evolución de los seres humanos de *Homo habilis* hasta *Homo sapiens sapiens*.
CENOZOICO	TERCIARIO	Neogénico		Plioceno	5.2		Se completa el puente terrestre (istmo de Panamá) que conecta América del Norte con América del Sur. * Disolución de caliza, acelerada por la corrasión, desde esta época hasta el presente. * Emerge la caliza por encima del nivel del mar. * Muchos mamíferos terrestres –hasta cinco géneros- viven en la Isla. Evolución de primates bípedos de *Australopithecus* hasta *homo habilis*.
CENOZOICO	TERCIARIO	Neogénico		Mioceno		Ta	* Se genera la Formación Camuy. * Levantamiento de Puerto Rico; fractura por los cuatro costados, lo cual le da su forma actual. La deformación de la Cresta de Beata permite que se separe la placa del Caribe de la placa occidental.
CENOZOICO	TERCIARIO	Neogénico		Mioceno		Me	* Emergen los estratos terciarios más antiguos y la costa norte se sumerge, con el arqueamiento a lo largo del centro de la isla, debido a los movimientos orogénicos del Caribe.
CENOZOICO	TERCIARIO	Neogénico	23.5	Mioceno	23.5	Te	* Caliza Aymamón en proceso de formación en el Norte. * Caliza Aguada en proceso de formación en el Norte. * Miembros superiores de la Formación Cibao en proceso de formación en el Norte. * Caliza Ponce en proceso de formación en el Sur. Placa del Caribe se desplaza hacia el Oeste. La masa terrestre que se extiende desde las Islas Vírgenes hasta La Española aún está en el mismo lugar.
CENOZOICO	TERCIARIO	Paleogénico		Oligoceno		Ta	* Miembros calizos de la Formación Cibao en proceso de formación en el Norte. * Parte superior de la Caliza Lares en proceso de formación en el Norte. * Formación Juana Díaz en proceso de formación en el Sur.
CENOZOICO	TERCIARIO	Paleogénico		Oligoceno		Me	* Caliza Lares en proceso de formación en el Norte. * Formación Juana Díaz en proceso de formación en el Sur. * Formación San Sebastián en proceso de deposición en el Norte. * Existen montañas con altura mayor de 3175 m, lo cual permite el crecimiento de especies arbóreas de clima frío a templado. El ámbar de la República Dominicana contiene muchos invertebrados y pocos vertebrados.
CENOZOICO	TERCIARIO	Paleogénico		Oligoceno	34	Te	Se extiende una gran isla desde Islas Vírgenes hasta La Española. * Una especie de perezoso terrestre, *Acrotocnus*, transitaba por la masa terrestre. La placa del Caribe comienza a desplazarse hacia el Oeste.
CENOZOICO	TERCIARIO	Paleogénico		Eoceno	55		Se forman las Montañas Rocallosas (Rocky Mountains). América del Sur se aisla de otros continentes. * Erosión intensa de las montañas de Puerto Rico. * Montañas altas cerca de Utuado y Ciales.
CENOZOICO	TERCIARIO	Paleogénico	65	Paleoceno	65		Evolucionan las palmas, los cactos y los pinos. Se desarrolla la Cordillera de los Andes. Las aves se diversifican en muchas subclases. * Caliza Cuevas en el Sur. * Batolito de Utuado y San Lorenzo. Placa del Caribe se desplaza hacia el Oeste-noroeste
MESOZOICO		Cretáceo			89	Ta	Levantamiento de la isla grande desde las Islas Vírgenes hasta La Española Corteza caribeña en deformación activa. Extinción de los dinosaurios * Depósito de Caliza San Germán en el suroeste * Islas volcánicas en lo que es hoy Orocovis y Barranquitas
MESOZOICO		Cretáceo	146		146	Te	Evolucionan los angiospermas La corteza caribeña se sitúa al oeste de América del Sur. * Se deposita la Caliza Parguera en el suroeste. * Se deposita la Caliza Aguas Buenas en los flancos de la isla volcánica. * Los millones de años de actividad volcánica crean las islas al este de Puerto Rico (Antillas Mayores)
MESOZOICO		Jurásico	208				* Rocas volcánicas más antiguas de Puerto Rico. Comienza a formarse el canal marítimo del Caribe. Comienzan a desprenderse Laurasia Occidental (América del Norte) y Gondwana Occidental (América del Sur).
MESOZOICO		Triásico	245				Plantas Cycadophita Continente Pangea comienza a desprenderse Subclase de dinosaurios

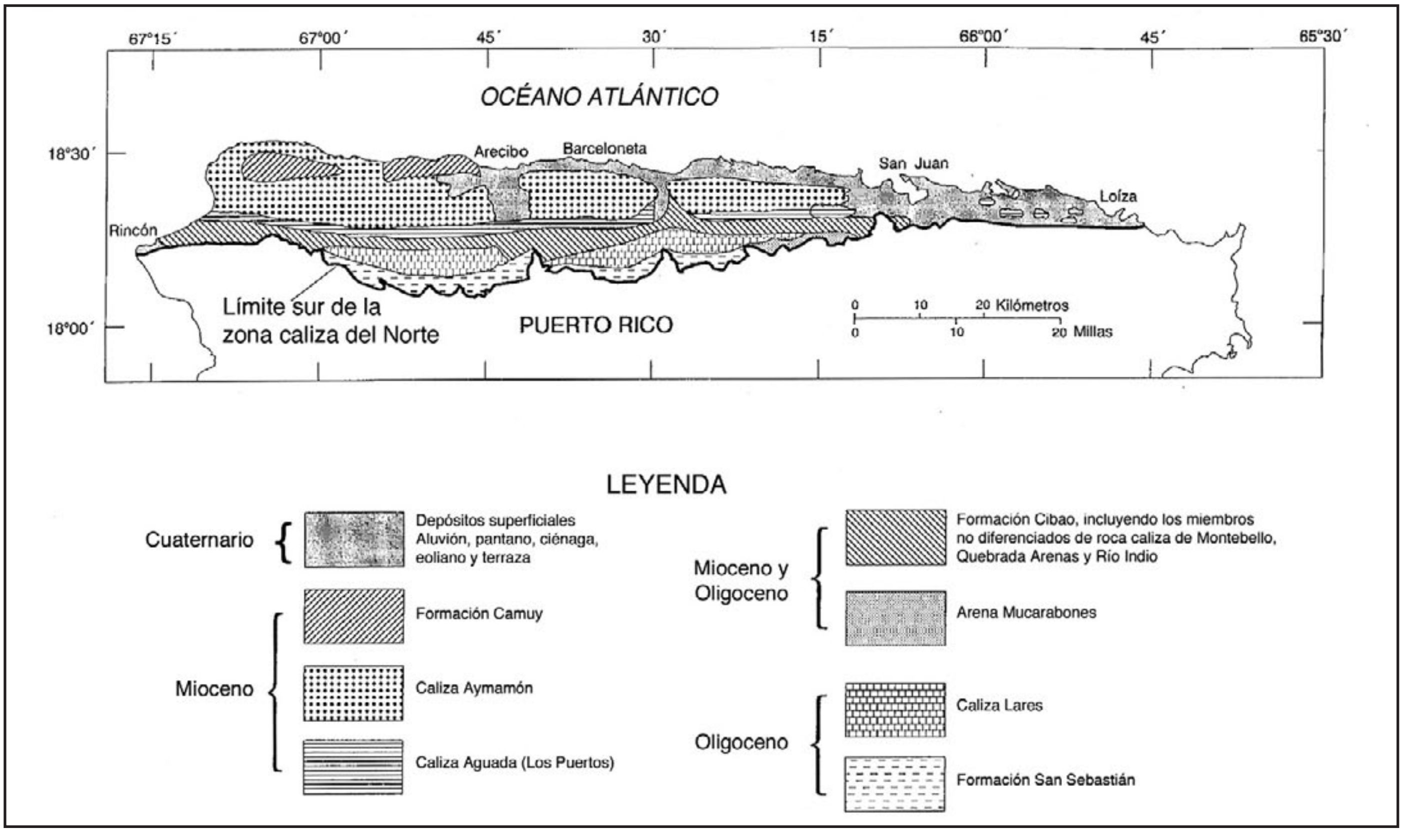

Figura 8. Mapa geológico generalizado de la zona caliza del Norte de Puerto Rico (Rodríguez Martínez 1995).

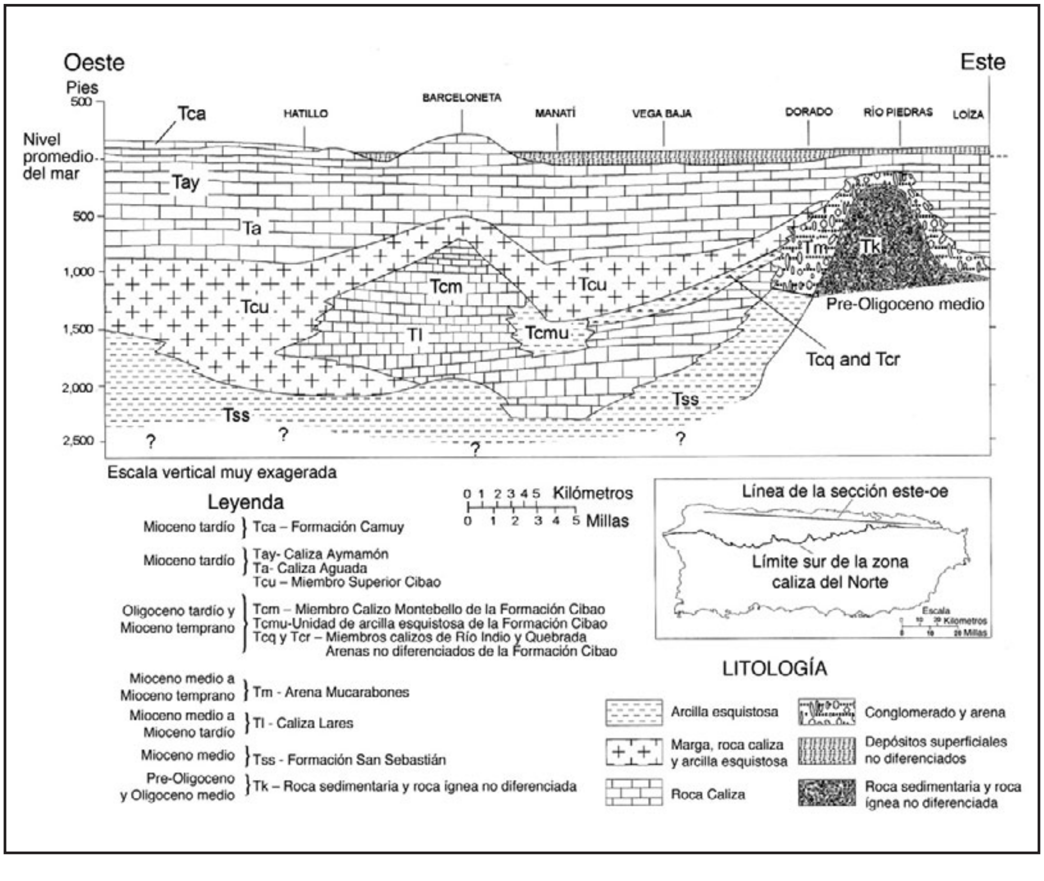

Figura 9. Secuencia geológica generalizada este-oeste del Terciario medio en la zona caliza del Norte de Puerto Rico (Rodríguez Martínez 1995).

continuación de la página 13

Oligoceno y el Mioceno (Seiglie y Moussa 1984).

Clasificación de los Estratos Calizos

Las calizas de la costa norte parecen uniformes y para la persona que no es especialista le es difícil distinguir una formación de otra. Sin embargo, se distinguen a base de diferencias paleontológicas (Giusti y Bennett 1976). Cada tipo de caliza interactúa con condiciones locales para producir tipos particulares de formaciones kársticas en la topografía (recuadro 6). Monroe (1976, 1980) desarrolló la nomenclatura para las secuencias calizas, basado en la estratigrafía, y Seiglie y Moussa (1984) la modificaron con datos paleontológicos y litológicos recopilados de dos pozos de agua en la zona de Manatí (Rodríguez Martínez 1995). Utilizamos las descripciones de Monroe (tabla 4), pero indicamos las modificaciones de Seiglie y Moussa (1984) y Rodríguez Martínez (figura 10).

Monroe (1976, 1980) clasificó los estratos de roca caliza en seis formaciones que varían en edad desde el Oligoceno medio al Mioceno tardío (tabla 4). Estas formaciones yacen sobre la Formación de San Sebastián, que no es roca caliza ni presenta rasgos kársticos, sino que forma un **lecho de confinamiento impermeable** debajo de la Caliza Lares y por encima del substrato volcánico de la Isla. En orden ascendente, las formaciones calizas son (figura 10) Caliza Lares, Arena Mucarabones, Formación Cibao, Caliza Aguada, Caliza Aymamón y la Formación Camuy. La Arena Mucarabones no se incluye en la tabla 4. La Arena Mucarabones consiste principalmente de arena de estratificación cruzada de color grisáceo-anaranjado y amarillo, con grano fino a mediano. Alcanza su espesor máximo de 120 m en el

continua en la página 18

Recuadro 6. Patrón general de correspondencia de los rasgos kársticos con las formaciones de roca caliza del Norte de Puerto Rico (Monroe 1976). La Formación San Sebastián no desarrolla rasgos kársticos.

Caliza Lares	Karso de cono de formación particular—conos de cima redonda y en algunas partes irregulares. Conos y crestas dentadas. Cavidades grandes.
Formación Cibao	Crestas Escarpa de tipo cuesta Karso de cono y riscos Zanjones Grietas acuíferas Valles cegados
Caliza Aguada	Escarpa alta orientada hacia el sur desde San Juan hasta Aguadilla, hasta de 100 m Dolinas de disolución, hasta de 30 m de profundidad, separada por crestas redondeadas Karso de cono típico Dolinas de disolución de laderas empinadas formadas por coplapso, de hasta 70 m de profundidad Cavidades cortas **Arcos naturales** Pequeñas depresiones que semejan poljes. Torres de laderas empinadas conectadas por crestas filosas cuando están adyacentes a la Caliza Aymamón
Caliza Aymamón	Mogotes Karso de torre Escarpa de tipo cuesta Pozos verticales Pocas cavidades Espeleotemas puntiagudas **Charcas de disolución**
Formación Camuy	Simas cilíndricas hasta de 30 m de profundidad Escarpa de tipo cuesta Sumideros de hasta 20 cm de diámetro en el miembro central

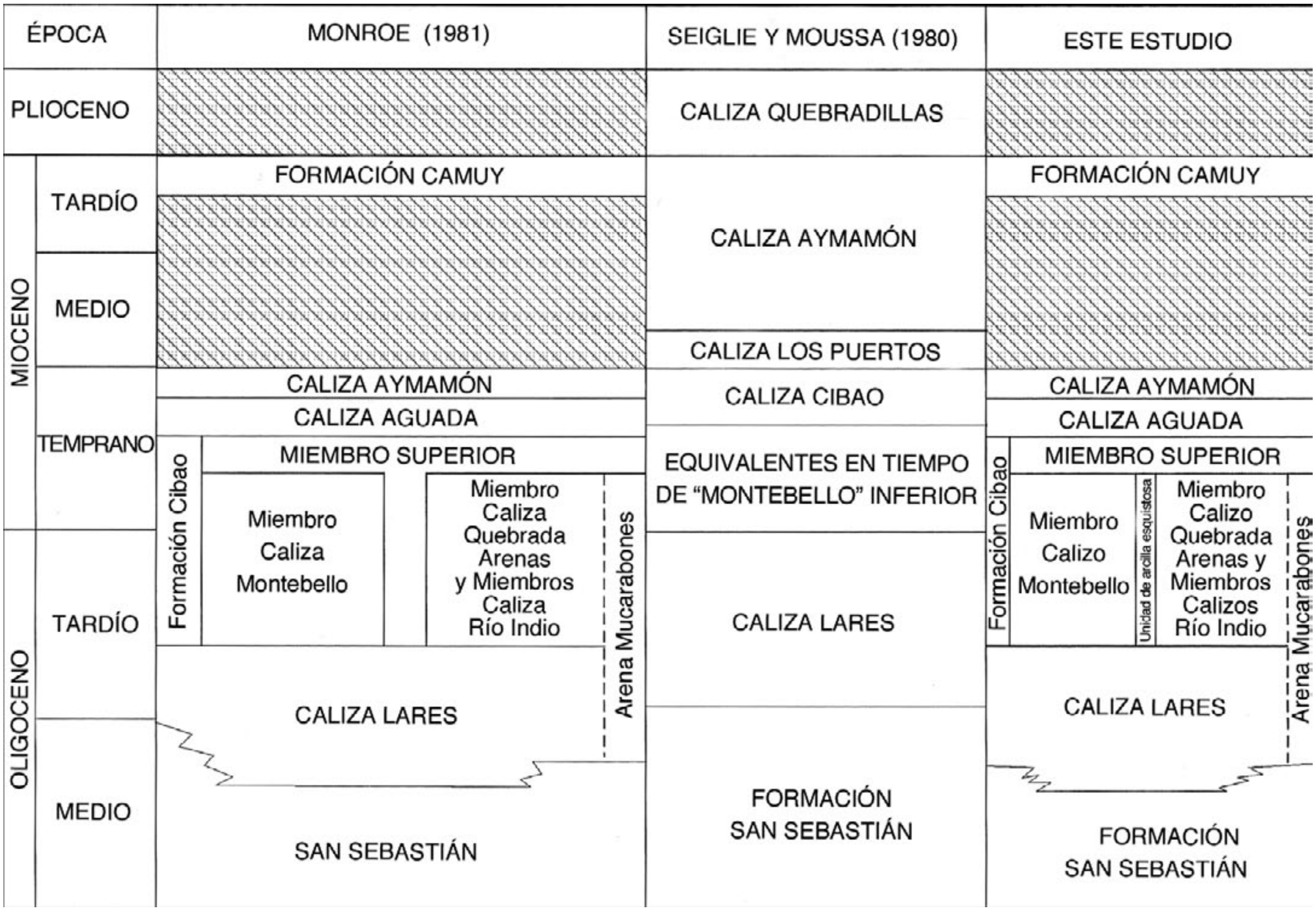

Figura 10. Secuencia de nomenclatura estratigráfica del Terciario medio en la zona caliza del Norte de Puerto Rico (Rodríguez Martínez 1995). “Este estudio” se refiere al estudio de Rodríguez Martínez.

Tabla 4. Estratos del Terciario medio en la zona norte de Puerto Rico (Monroe 1976, 1980). El grosor máximo de los estratos se indica entre paréntesis (Giusti 1978). Ma indica millones de años atrás.

Mioceno—Desde 23.5 a 5.2 Ma

Formación Camuy — arenisca, caliza y creta arenosa y ferruginosa (200 m).
Disconformidad.
Caliza Aymamón — creta muy pura indurada en su superficie para convertirse en caliza dura; creta un poco ferruginosa en la parte superior, noroeste de Puerto Rico (300 m).
Caliza Aguada — caliza dura estratificada en gradación descendiente hasta creta; arenosa en algunas partes (90 m).
Formación Cibao — (230 m)
- Miembro superior; creta y caliza blanda
- Miembro Guajataca; (en la zona oeste únicamente) arcilla calcárea fosilífera y caliza con lentes de arena y grava de grosor de hasta 15 m.
- Miembro de Arena Miranda; (en la zona este únicamente) arena y grava, arena y arcilla arenosa.
- Miembro de Caliza Montebello; (en la zona central únicamente) calcarenita pura friable, indurada al ser expuesta a caliza resistente a la erosión.
- Miembro de Caliza Quebrada Arenas; (en la zona este únicamente) caliza estratificada de cristalización fina

Oligoceno—Desde 34 a 23.5 Ma

- Miembro de la Caliza Río Indio; (en la zona este únicamente) caliza compacta, gredosa, de color amarillento-anaranjado y de estratificación débil.
- Creta o marga típica; (en las zonas este y oeste) creta arcillosa, arenosa y cenagosa.

Caliza Lares — caliza casi pura, de estratificación fina a gruesa; la parte inferior contiene granos de cuarzo y arena limonita, intercalada al oeste con arena y grava, cartografiada con la Formación San Sebastián (300 m).
Formación San Sebastián—mayormente arena y arcilla, de estratificación débil alguna caliza arenosa, en algunas partes, sobre todo al oeste, arena y grava (300 m).
Disconformidad (angular).

Cretáceo al Eoceno—De 146 a 34 Ma

Roca volcánica, sedimentaria e intrusiva.

continuación de la página 16

cuadrángulo de Bayamón. La profundidad total de todos los estratos es de unos 1,700 m, que incluyen más de 300 m de arcilla, limo y grava, principalmente al fondo de la secuencia (Monroe 1966).

Origen del Karso

El karso se origina cuando la roca caliza se levanta y los efectos combinados del clima y el nivel freático modifican sus rasgos. El karso puertorriqueño fue influenciado por el clima tropical, que incluye los vientos alisios, y además por las varias formaciones calizas de la isla (Monroe 1976). El clima y los vientos alisios funcionan como agentes físicos y químicos de erosión, disolución, redeposición y reformación de la caliza (recuadro 7). Monroe (1976) resumió el papel del clima y los vientos (p. 1):

"El viento húmedo y cálido de la franja de los vientos alisios promueve el desgaste rápido e intenso de toda roca intrusiva y volcánica, lo cual produce suelos muy espesos. Las lluvias torrenciales causan una erosión rápida del suelo y cuando el suelo contiene granos minerales abrasivos, la erosión rápidamente profundiza los valles. Las lluvias también llevan a la ***cementación*** *de la caliza, ya que cuando el agua penetra la caliza porosa disuelve inmediatamente las superficies de los granos y cristales de calcita. Puesto que estas lluvias suelen ser muy breves, seguidas de un sol brillante, la roca mojada se calienta, el dióxido de carbono se expele y el carbonato de calcio se reprecipita esencialmente en el mismo lugar. Las corrientes que contienen arena, grava y guijarros derivados de suelos en la roca ígnea, han erosionado unos profundos cañones en la caliza y han ensanchado los pasajes de las cavidades fluviales de Puerto Rico. La dirección casi constante del viento ha resultado en la asimetría de muchas de las lomas calizas en los lugares donde están suficientemente aisladas que quedan expuestas al impacto pleno del viento".*

Recuadro 7. El clima facilita la redeposición por disolución, la recristalización y cementación de la caliza (Monroe 1966, 1976).

El clima de Puerto Rico es tropical, pero moderado por los vientos alisios que mantienen la temperatura promedio anual en una variación muy estrecha entre 21º C en las alturas y 30º C en la planicie costera del Sur. Los extremos de temperatura registrados varían entre 6º y 40º C (Monroe 1976). Los vientos alisios por lo regular soplan desde el norteste o el sureste. Promedian unos 18 km/hr, con ráfagas de hasta 24 km/hr menos del 5 por ciento del año, 38 km/hr menos del 1 por ciento del año y de un máximo de 250 km/hr durante los huracanes de categoría 5 en la escala Saffir/Simpson. La lluvia se distribuye de manera pareja entre las estaciones. Por lo regular, hay un periodo de sequía que comienza en diciembre y suele terminar en marzo o abril. Hay un periodo de lluvia en abril y mayo y un periodo errático, semiseco, en junio y julio, y un periodo lluvioso desde agosto hasta noviembre. La precipitación mensual mayor ocurre en septiembre (Giusti 1978). Además, hay una variación anual con periodos lluviosos y secos definidos que pueden durar hasta una década, pero en general con suficiente lluvia para sostener la evapotranspiración. La evaporación real es más alta que la precipitación en la mayoría de las estaciones pluviométricras. Los eventos de precipitación tienen límites muy definidos, ocurren de repente y son de corta duración (de 15 a 30 minutos) pero intensos. Cuarenta de 100 de las estaciones pluviométricas de Puerto Rico registran >12.7 mm de lluvia de 30 a 50 días al año. Es raro que el suceso dure todo un día. Los huracanes pueden producir hasta 400 mm de lluvia en un día.

Estas características climáticas surten varios efectos en el desarrollo del paisaje.

- Las temperaturas prevalecientes facilitan las reacciones químicas que disuelven, erosionan, redepositan y cementan la caliza.
- Los patrones de precipitación facilitan la disolución de la caliza y transportan las aguas que causan la erosión.
- Los procesos de evaporación contribuyen a la cementación y la recristalización.
- Los vientos forman el paisaje al soplar la lluvia de manera desigual en las fisuras de la roca en las laderas del este y noreste de las lomas, saturando esos lados más que las laderas del oeste.

Los climas en las zonas de vida secas producen caliche a medida que el agua que se evapora sube a la superficie mediante la acción capilar y precipita carbonato de calcio puro.

En consecuencia, el legado que representa la topografía kárstica sería un registro de los eventos climatológicos del pasado, si pudiéramos encontrar la manera de "leer" las señales climatológicas. El recuadro 8 muestra como los científicos investigan e interpretan las señales climatológicas en las cavidades de Puerto Rico.

Desarrollo de la Topografía del Karso

Giusti (1978) consideraba el karso de mogote como una etapa del desarrollo del karso. Primero, las depresiones cerradas y llanas crean una topografía de cráteres. Luego se desarrolla el karso de gallera, un karso accidentado, seguido del karso de mogote y el drenaje fluvial sobre arenas de manto. Según este esquema, la zona kárstica del noreste es más antigua que la del noroeste. Otra hipótesis es que la red fluvial, que discurre desde el interior, se desarrolló en la superficie de la región kárstica antes de que desarrollara suficiente porosidad de solución capaz de desviar estas corrientes por debajo de la tierra.

continua en la página 20

Figura B8-1. Algunas estalagmitas en la Cueva de la Luz del Sistema de Cavernas del Río Camuy.

Figura B8-2. Muestra de estalagmita cortada a lo largo de su eje (a); una fotografía detallada (b) revela las bandas alternas de cristales porosos y oscuros y de cristales densos con colores claros.

Recuadro 8. Calcitas de las cavidades como registros del clima. El cambio climático no se puede detectar en todas las calcitas de cavidades, pero si se escogen con cuidado, pueden revelar una historia detallada del clima del pasado, mediante la utilización de métodos que se explican a continuación.

Las estalagmitas y estalactitas en las cuevas usualmente se componen de calcita ($CaCO^3$); la cual se forma al gotear el agua del techo—las estalactitas cuelgan del techo y las estalagmitas se forman en el suelo. Esta agua comienza como lluvia y luego se percola por el suelo, disolviendo el gas de bióxido de carbono (CO^3) de los organismos en el suelo, convirtiéndose así en ácido carbónico diluido (H^2CO^3). Este ácido diluido entonces pasa por las capas de caliza sobre la cavidad, disolviendo la calcita ($CaCO^3$) de la roca. Cuando el agua emerge de una fisura en el techo de la cueva, contiene bastante CO^2 y $CaCO^3$ disueltos. Cuando la gota se encuentra con el aire de la cueva, el CO^2 sale del agua y se difumina en el aire de la cueva. Cuando esto sucede, el $CaCO^3$ también tiene que salir de la solución y así el goteo deposita una leve capa de $CaCO^3$ o calcita. Al cabo del tiempo, si el goteo continúa en el mismo lugar durante siglos, las capas de calcita se acumulan en depósitos de tamaño considerable, algunos de los cuales cuelgan del punto de goteo en el techo y otros de los cuales crecen hacia arriba desde el punto en que caen las gotas en el suelo (figura B8-1).

Estas estalagmitas y estalactitas son muy hermosas, pero también son de gran valor científico ya que las capas que se acumulan durante los siglos y los milenios muestran variaciones según los cambios climáticos. En algunos casos, el clima antiguo, el paleoclima, se puede reconstruir mediante el estudio de las capas de los cristales de calcita. Esto es importante porque si podemos comprender cómo y porqué el clima cambió en el pasado, tenemos una buena posibilidad de poder comprender lo que sucede con los climas actuales. En algunos lugares, como Puerto Rico, es posible que no haya ningún registro de los cambios en el paleoclima aparte de la calcita de las cuevas y en ésto radica su valor científico.

El cambio en el clima se expresa como cambio de temperatura y/o cambio de humedad. En Puerto Rico, los cambios importantes han sido en la humedad. Las cuevas usualmente son muy húmedas y la calcita se acumula lentamente, capa tras capa, mediante la pérdida de CO^2, como se explicó anteriormente. Sin embargo, si la cueva se seca, el goteo comienza a evaporarse y la calcita se comienza a depositar con más rapidez y en grumos. La calcita formada en épocas húmedas mostrará cristales finos y alargados, en capas densas y compactas; por otro lado, la calcita formada en épocas secas con frecuencia es muy porosa, con huecos entre los cristales, y los cristales suelen ser muy pequeños y anchos. Así, la alternación de capas densas con capas porosas muestra la alternación entre climas secos y húmedos y por lo tanto, si se estudia el cambio de porosidad en una estalagmita con el tiempo, se podrá demostrar los niveles cambiantes de humedad en la cueva. La figura B8-2 muestra un corte transversal de una estalagmita de Puerto Rico que revela las capas porosas y densas.

A veces las distintas capas sólo se pueden apreciar en escala microscópica. Por ejemplo, algunas estalagmitas de las regiones tropicales con evidentes variaciones estacionales, muestran una doble capa para todos los años y el grosor y la composición química de las capas varían según la intensidad de la Oscilación del Sur de El Niño. En otros ejemplos, las capas se expresan como bandas fluorescentes que sólo pueden detectarse con luces ultravioleta o con láser. En este caso, las bandas usualmente indican cambios en la actividad biológica en el suelo encima de la cavidad, los cuales a su vez se relacionan con cambios en el clima.

Los cambios de clima afectan la composición química en las calcitas de las cavidades. Algunos elementos comunes, tales como el oxígeno y el carbono existen de dos o más formas, es decir como isótopos, donde la forma rara es un poco más pesada que la forma común. El balance entre el isótopo normal liviano y el isótopo raro y pesado cambiará en distintas condiciones; por ejemplo, el CO^2 de las hierbas secas tropicales contiene un poco más de carbono pesado que el CO^2 de los árboles tropicales muy húmedos. Un cambio en la vegetación de hierbas a árboles causa un cambio general de disminución en la presencia de carbono pesado en los cristales de $CaCO^3$ de la estalagmita. Otro ejemplo es el efecto de las distintas temperaturas en el oxígeno: a medida que se enfría la cueva, la calcita tiene más oxígeno pesado que en los periodos más calientes.

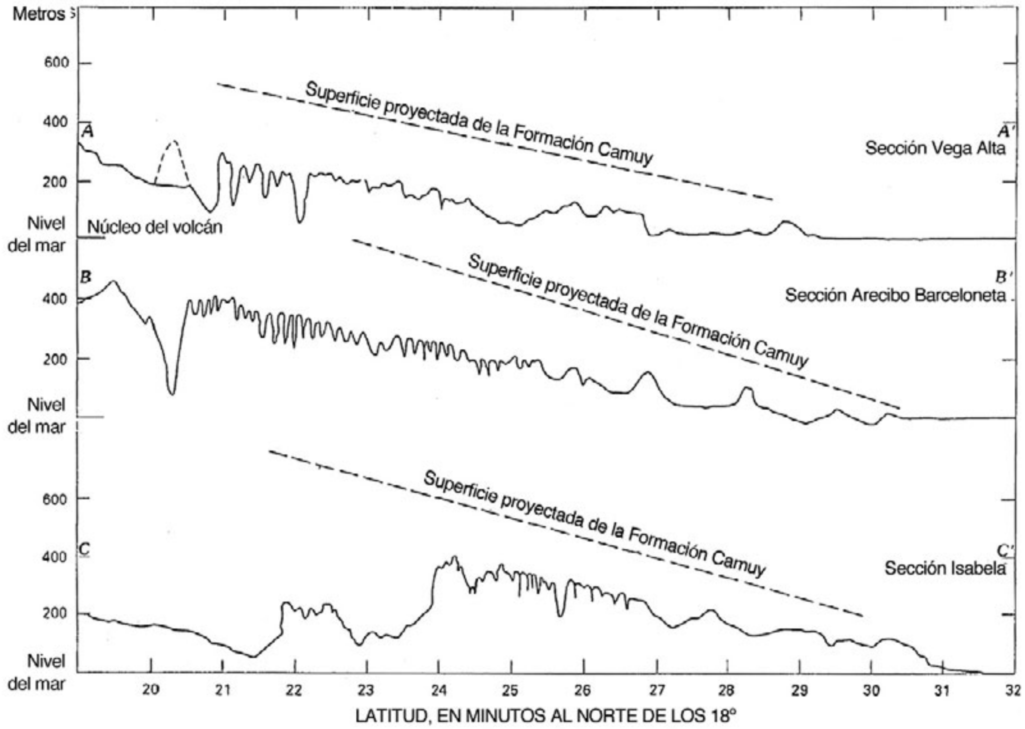

Figura 11. Cortes norte-sur a través de la franja kárstica con la proyección de la superficie original de la Formación Camuy (Giusti 1978). La ubicación de los cortes se muestra en la figura 3.

Las depresiones y sumideros luego se concentraron en las **vaguadas** o líneas de corriente y finalmente se desagregaron, produciendo la superficie aparentemente caótica que tenemos hoy. Todavía quedan rastros de los canales superficiales en la frontera sur de la franja kárstica y en algunas corrientes que se sumergen. Por ejemplo, el río Tanamá presenta evidencia de cavidades formadas debajo del nivel de los canales de superficie actualmente abandonados. En este cuadro hipotético, las corrientes más grandes como el río Grande de Arecibo y el río Grande de Manatí nunca fluyeron debajo de la tierra sino que eran de suficiente tamaño para mantener un curso superficial hasta el mar. Esta clase de fase fluvial inicial en el karso es común en otros lugares, como Belice, Guatemala y Nueva Guinea (Miller 1987).

Giusti (1978) calculó la tasa de **denudación kárstica** de la franja kárstica. Reconstruyó el perfil original de la región (figura 11) y observó que, por ejemplo, la superficie original de la sección Arecibo Barceloneta (Sección B-B') tenía una altura promedio de 550 m en comparación con el actual promedio de 230 m. Por lo tanto, 320 m de espesor de caliza se había disuelto al pasar el tiempo geológico. Giusti calculó que la franja caliza surgió del océano hace unos 4 millones de años. La tasa de denudación sería un promedio de unos 0.070 mm/año, un valor que podría ser hasta un 40 por ciento mayor en los lugares donde la abrasión era un factor para tomarse en cuenta.

La Franja Kárstica es Diversa

Las formaciones kársticas de Puerto Rico se han producido en su totalidad en rocas de carbonato y en su mayoría en la roca caliza. El aspecto más destacado de la diversidad de la franja kárstica es la gran cantidad de formas que resultan de la modificación de la caliza. En esta sección, describiremos las características geomorfológicas, hidrológicas y ecológicas de la franja kárstica y de la caliza del Norte.

Diversidad Geomorfológica

Para describir la diversidad geomorfológica de la franja kárstica seguimos el orden establecido por Monroe (1976), quien se concentró en las características de los valles y las lomas, los acantilados de los ríos y las costas, los zanjones y las cavidades. La mayoría de las características de la franja kárstica aparecen en los dos cortes transversales norte-sur de la región en la figura 7. El recuadro 6 relaciona las características del karso con la formación caliza particular donde ocurren con mayor frecuencia.

Formaciones de los Valles

Valles Secos -- Los valles secos pueden incluir quebradas intermitentes que se llenan de agua durante los aguaceros fuertes, pero en general están secas, y se encuentran esparcidos en toda la franja kárstica. Monroe (1976) describió el valle de 10 km de largo de la Quebrada Cimarrona en el límite al sur del cuadrángulo de Barceloneta,

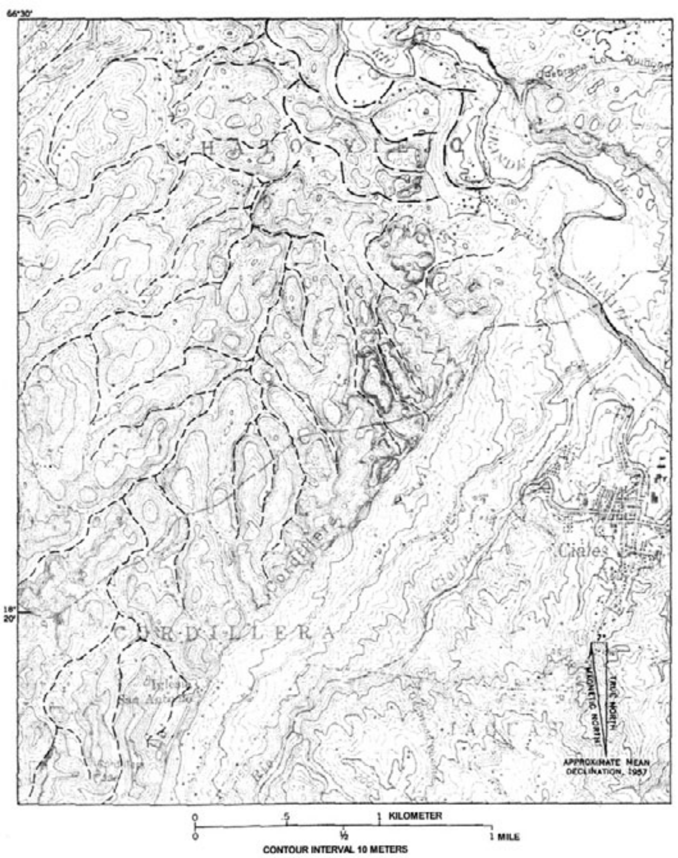

Figura 12. Mapa topográfico de la parte Noroeste del cuadrángulo de Ciales, en que se muestran valles secos atrincherados en patrón dendrítico. Las rayas largas entrecortadas indican los meandros abandonados del río Grande de Manatí y los entrecortados cortos trazan los valles secos (Monroe 1976).

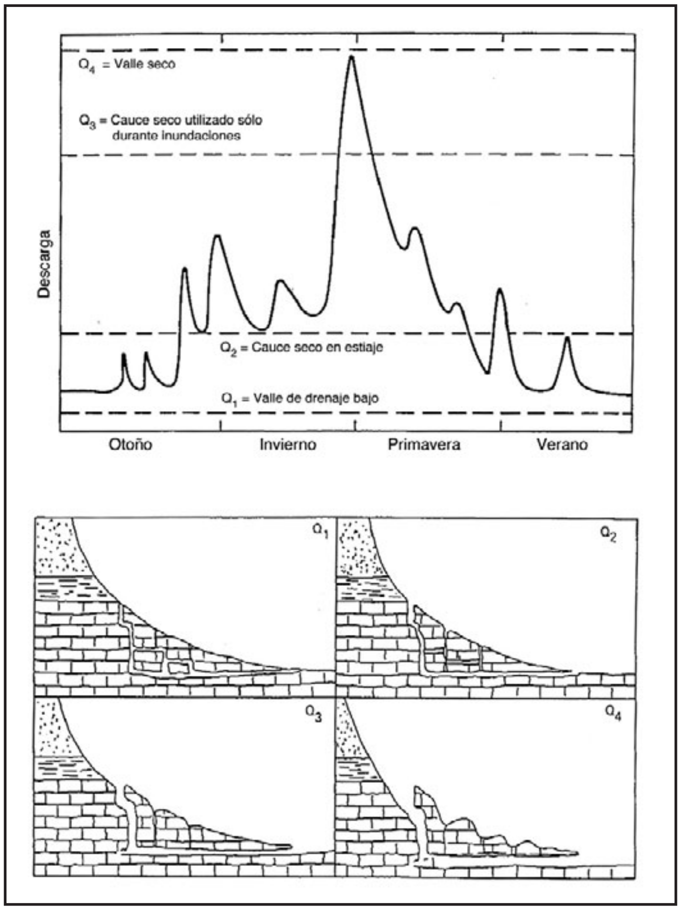

Figura 13. Parte superior: Dibujo esquemático de hidrografía anual de la cuenca de una quebrada superficial. Las líneas entrecortadas indican el caudal del sistema de drenaje subterráneo en evolución. Parte inferior: El sistema de drenaje subterráneo en evolución en una región kárstica. (Q_1) desde un valle subdrenado, (Q_2) pasando por el cauce seco durante los estiajes y con una grieta al acuífero muy bien drenada, (Q_3) hasta el desarrollo de un cauce excavado río arriba y un pozo de infiltración, y (Q_4) hasta la pérdida total del cauce superficial con el desarrollo concurrente de un valle cegado río arriba y la descomposición del perfil del valle mediante el desarrollo de dolinas río abajo (White 1988). Los bloques representan la roca caliza y el área moteada representa las áreas que no tienen roca carbonatada.

que dejó de fluir entre 1960 y 1965 y desde entonces ha sido un valle seco. Demostró que los valles secos de la Caliza Lares tienen un patrón dendrítico y tienden hacia el noreste desde la escarpa de Lares hacia los meandros abandonados del río Grande de Manatí (figura 12). Las depresiones cerradas, drenadas por **pozos de infiltración** interrumpen el valle, de manera que la escorrentía de hoy rápidamente se convierte en subterránea. Tal parece que el curso de los valles secos lo determinaba una red de drenaje erosionada en la materia clástica que en algún momento cubrió la roca caliza. La erosión continuada del material de manto y la captura del sistema de drenaje por parte de canales fluviales adyacentes o por sistemas de drenaje subterráneos dejó expuesto al anterior sistema de drenaje en su actual configuración de valle seco. Las condiciones hidrológicas que llevaron a la formación de los valles secos se muestran en la figura 13. A medida que el proceso de disolución de la roca caliza avanza en determinado lugar, un **hidroperiodo** que en su inicio tenía drenaje superficial evoluciona para convertirse en un sistema subterráneo con un valle seco encima de la corriente subterránea.

Depresiones Cerradas -- Éstas se forman como resultado de la disolución de la roca subyacente, el **colapso de cavidades** subterráneas grandes, derrumbes o excavación de arenas de manto por parte del viento. Las depresiones cerradas también se conocen como dolinas o sumideros. Hay miles de estas en la franja kárstica. Las depresiones cerradas pueden ser circulares, ovaladas, o irregulares y pueden tener una profundidad de hasta 120 m. Son la expresión en la superficie de una de las etapas de erosión kárstica y su hidrología es muy variada. Las depresiones más profundas se encuentran en la Caliza Aguada, cerca del contacto expuesto con la Caliza Aymamón, y en la Caliza Lares cerca del contacto expuesto con la Formación Cibao (Monroe 1976). Cinco de los nueve **puentes naturales** o túneles cortos por los cuales fluye el río Tanamá son formaciones de colapso en las cuales persiste la roca originaria.

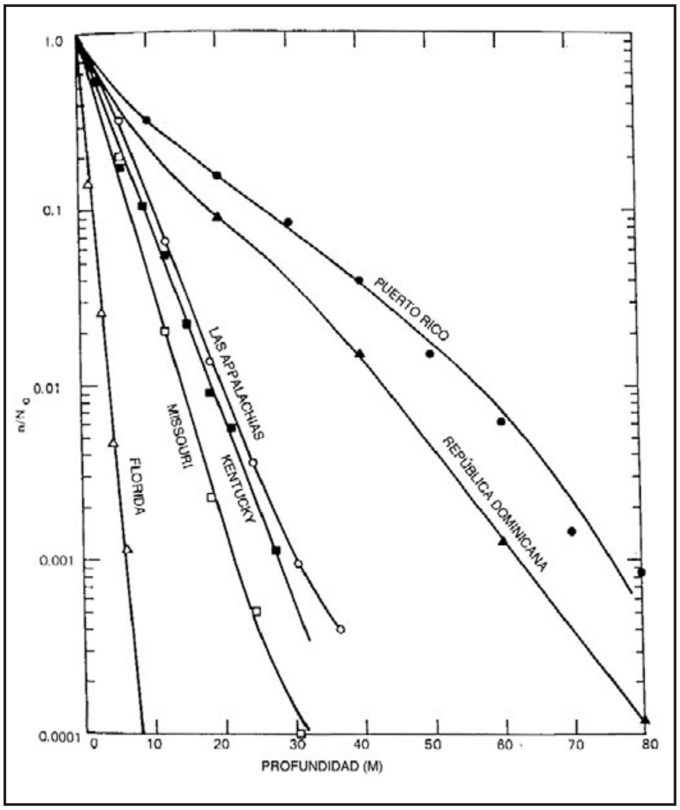

Figura 14. Frecuencia y distribución de profundidad de los sumideros de seis regiones kársticas (White 1988). "N_0" es la cantidad de sumideros de profundidad cero, partiendo de que la función de distribución exponencial es válida para todo el rango. El valor n/N_0 es la fracción de sumideros en la región; con la profundidad representada en el eje x. La pendiente de la curva indica el relieve interno, desde llano en el estado de Florida en los EE.UU. hasta una distribución compleja en la República Dominicana y Puerto Rico.

Los otros cuatro túneles se desarrollaron por acreción de los lados debido al carbonato de calcio de los manantiales que entran por los lados al cañón.

El karso de dolina más típico en Puerto Rico se encuentra en la Caliza Aguada en el área sur del cuadrángulo de Manatí (Monroe 1976). El karso de dolina se va intercalando con el karso de mogote que caracteriza la Caliza Aymamón (foto 11). Giusti (1978) demostró que la distribución de dolinas en la topografía es aleatoria. Esto sugiere que no hay una vía dominante de infiltración hidrológica.

El por ciento del área cubierta de sumideros se usa como índice del grado de desarrollo de las características kársticas en la topografía (Giusti y Bennett 1976). Al norte de la Formación Cibao, los sumideros llegan a ocupar un 50 por ciento del terreno. El por ciento del terreno ocupado por sumideros se relaciona con el relieve topográfico (Giusti y Bennett 1976). El rango de cifras de relieve máximo asociado con el desarrollo extenso de sumideros es muy amplio. Los valores menores de relieve se asocian con las etapas tempranas del ciclo del karso, cuando los sumideros apenas comienzan a formarse, o con etapas tardías cuando las partes altas entre los sumideros se han destruido y los sumideros se han rellenado. El análisis comparativo de distribución y de frecuencia-profundidad de los sumideros (figura 14) indica que el karso tropical posee un relieve interno mayor que el karso templado y que el karso de Puerto Rico es particularmente alto con respecto al relieve interno. Troester y otros (1984) informaron que 4,308 sumideros en Puerto Rico tenían una densidad de 5.39/km^2 con una profundidad promedio de 19 m.

Sumideros Rellenos -- Los pozos de infiltración al fondo de los sumideros o valles secos pueden obstruirse con arcilla y por consecuencia llenarse hasta el borde con aluvión. Estos sumideros se denominan sumideros rellenos y abundan en el cuadrángulo de Manatí en la Caliza Aguada y la Formación Cibao (Monroe 1976).

Valles Cegados -- Los **valles cegados** se forman donde la Caliza Aguada se sobrepone a una espesa masa compuesta de creta margosa de la Formación Cibao y permite que las quebradas perennes o intermitentes desaparezcan por los pozos de infiltración o las cavidades. Son comunes en el cuadrángulo de Vega Alta (Monroe 1976). Las cavidades de los valles cegados a veces se denominan cavidades de quebrada porque puede llenarse a capacidad con las escorrentías. Por esta razón, la mayoría de estas cavidades no albergan murciélagos ni rastros de vida terrestre, aunque puede abundar la vida acuática. Las aves acuáticas habitan en los humedales estacionales que se forman en estos valles.

Lomas

Karso de mogote -- Los mogotes son lomas o torres aisladas y escarpadas que surgen de los depósitos de arena de manto del norte de

Foto 11. Karso de dolina. Foto J. Colón.

Foto 12. Los mogotes son lomas calizas residuales. Foto de L. Miranda Castro.

Recuadro 9. Rasgos significativos de un mogote según descrito por Monroe (1966), con un corte a lo largo de la carretera estatal PR 2, km 34.6, entre Vega Baja y Vega Alta (figura B9-1).

Este mogote se conoce como el Mogote de Monroe, un destino muy concurrido en las expediciones de campo de los geólogos (Troester y Rodríguez Martínez 1990). Los rasgos más destacados son:

- caliza no consolidada, pero perforada mediante disolución con moldes de moluscos en el extremo noroeste;
- induraciones del mismo lecho a los extremos del corte;
- ausencia de espeleotemas en las perforaciones de disolución en los dos tercios al noroeste del corte, excepto en la corteza exterior misma;
- abundancia de espeleotemas en el tercio sureste del corte;
- laderas muy empinadas; y
- cubierta gruesa de caliza muy dura con depresiones de disolución.

Foto 13. Lados verticales de los mogotes. Foto de J. Colón.

Puerto Rico. B. Anthony Stewart, fotógrafo de la revista National Geographic, comentó sobre los mogotes de Puerto Rico: "Desde el aire, los montículos me recordaban huevos pintados puestos punta arriba en una canasta de Pascuas" (McDowell 1962, p 783). La mayoría de los mogotes alcanzan unos 30 m de altura, pero algunos miden más de 50 m y otros pueden ser tan bajos como de un metro (Monroe 1976). En algunas partes de la zona costera del norte, los mogotes están alineados en una cordillera de apariencia dentada. Las cavidades de disolución pueden observarse en las laderas de los mogotes, pero normalmente no atraviesan la loma de lado a lado. La mayoría de los mogotes se forman en la Caliza Aymamón y algunos se forman en la Caliza Aguada, con manto de Caliza Aymamón. Los mogotes son lomas residuales de caliza (foto 12) compuestas de material probablemente idéntico al material debajo de la arena de manto, salvo que ha sido endurecido por la precipitación, lo cual produce una caliza de creta o de tiza y recementación a medida que la evaporación va eliminando el agua y el dióxido de carbono (recuadro 9).

Los mogotes tienen una cubierta endurecida, redondeada o puntiaguda, en general de un espesor de 5 a 10 m. Esta cubierta se forma con el remojo repetido de la lluvia seguido de una casi total evaporación del agua. La roca de cubierta por lo general es más espesa en el lado hacia el este donde abunda más la lluvia y está más expuesta. En su lado oeste tiende a formar roca que sobresale por encima del material más blando. La roca de cubierta protege el interior de la loma de la erosión. Esto parecería paradójico, dado que la caliza es susceptible a la disolución. La caliza es resistente a la erosión a la vez que es susceptible a la disolución.

La caliza reprecipitada en las pendientes tiende a formar pendientes casi verticales (foto 13). Debido a que estos procesos ocurren a distintos ritmos alrededor del mogote - dependen de factores climatológicos que no son uniformes en toda la loma - el mogote tiende a

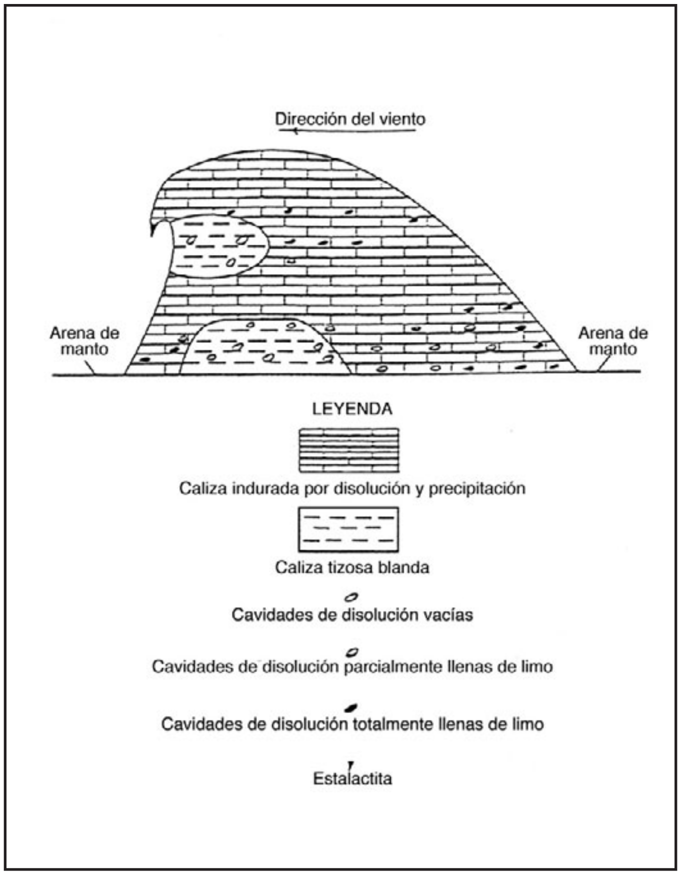

Figura B9-1. Diagrama de las características de un mogote asimétrico (Monroe 1976).

volverse asimétrico, con una pendiente marcada en el costado oeste de sotavento y una pendiente más suave en el costado este de barlovento (figura B9-1). La pendiente pronunciada invariablemente tiene una cubierta de roca que sobresale (en forma de visera) compuesta de caliza reprecipitada sumamente dura, sobre la cara más débil perforada por la disolución (Monroe 1976).

Karso de Conos -- Las lomas cónicas en la Caliza Lares forman el karso de conos (figura B2-1). Las lomas se agrupan linealmente con sumideros intercalados. El karso de conos también se encuentra en Cuba, Java y Jamaica, donde se conoce como karso de gallera. Esta formación, que todavía es objeto de debate, se atribuye a la disolución en las grietas de la roca caliza o a la noción de que los conos son residuos del colapso de cavidades de ríos subterráneos. Ciales es una zona típica del karso de conos. El karso de conos más desarrollado de Puerto Rico ocurre cerca del Observatorio de Arecibo, donde muchos de los conos son puntiagudos, casi circulares u ovalados, de 200 a 300 m de diámetro en la base y miden desde 50 a 75 m desde el fondo de las depresiones adyacentes. En los cuadrángulos de Florida y Utuado, los riscos verticales forman torres que sirven de cimas de los conos. Monroe (1976) denominó esta formación "**karso cónico con riscos**".

Acantilados Fluviales y Costeros

Éstos son muros naturales de caliza en las cimas de las paderes de los cañones, en las escarpas de falla y alrededor de los sumideros. Se forman como producto de la cementación secundaria y la erosión diferenciada. Abundan en los bordes superiores de los cañones de los ríos y en las cimas de los farallones costeros de caliza. Ya comentamos sobre el gran tamaño de los acantilados del río Guajataca (figura 6), que son los mejores ejemplares de Puerto Rico (foto 14). La formación de este acantilado se atribuye a la cementación causada por la precipitación de calcita, probablemente en una grieta y en la pared del cañón (Monroe 1976). Los acantilados costeros se pueden observar en las cimas de los farallones de Caliza Aymamón en Quebradillas e Isabela.

Zanjones

Los zanjones son trincheras paralelas que resultan de la disolución de roca caliza a lo largo de las grietas (figura 15). Las trincheras pueden extenderse 100 m o más, con costados verticales que varían desde unos pocos centímetros hasta 3 m de ancho y desde 1 a 4 m de profundidad. Los zanjones se orientan en la misma dirección y pueden haber hasta 8 por cada 100 m (Monroe 1976). Descritos por primera vez en Morovis y Florida, los mejores ejemplares de los zanjones se encuentran en Lares, donde las trincheras individuales pueden llegar a extenderse más de 1,800 m de largo y alcanzar un ancho de 20 m; estos zanjones se encuentran en una franja de un 1 km de ancho. Aquí los zanjones coalescieron parcialmente y formaron una topografía particular de este a oeste en la cual los zanjones individuales cortaron colinas longitudinales (Monroe 1976). Los zanjones son un rasgo exclusivo del karso puertorriqueño. El único rasgo común de las zonas del **karso de zanjón** es que se ubican en terrenos con caliza muy estratificada en la parte inferior de la sucesión estratigráfica de la caliza del Oligoceno (Monroe 1976). Giusti (1978) observó que los zanjones se forman donde la caliza es quebradiza y de estratigrafía muy fina.

Foto 14. Laderas del río Grande de Manatí, cerca de Ciales, Puerto Rico. Foto de J. Colón.

Cavidades[4]

Las cavidades de Puerto Rico se desarrollaron principalmente mediante

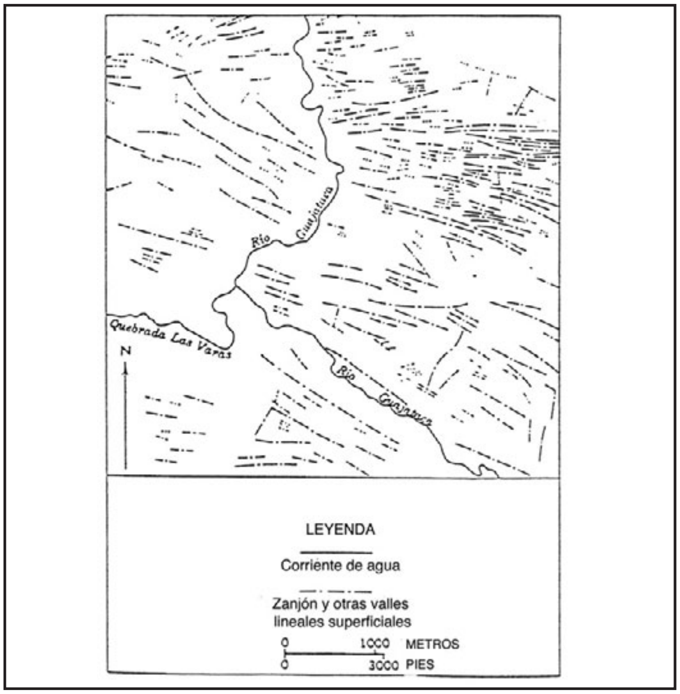

Figura 15. Mapa de la zona norte y noroeste de Lares en que se aprecia el paisaje dominado por zanjones y el curso del río Guajataca (Monroe 1976).

[4] Basado en Miller 2000. Otros términos para la palabra cavidad incluyen cueva, caverna y gruta.

procesos de disolución, modificándose con la abrasión causada por sedimentos **clásticos**. Se forman en lechos alternos de caliza blanda y dura (Giusti 1978). Las principales cavidades de la zona kárstica son de dos tipos básicos: las formadas por ríos nacidos en la cordillera central que fluyen por la zona y las formadas por la lluvia en la zona misma que se percola hacia abajo por la caliza. La abrasión, producto del sedimento transportado por los ríos de la cordillera, contribuye a ensanchar las cavidades a mayor tamaño. Además, existen las pequeñas cavidades al pie de risco que se forman en la caliza a los lados de los valles de los ríos y quebradas y las "cavidades marinas" o "**cavidades litorales**" formadas mediante la acción mecánica del mar que bate la costa. Debido al levantamiento tectónico en el pasado geológico, algunas de estas cavidades de mar ahora quedan a decenas de metros por encima de su elevación original. La mayoría son de tamaño reducido.

Gran parte de la disolución que crea y modifica las cavidades de Puerto Rico se debe a la combinación química del dióxido de carbono (creado en el suelo) con la percolación hidrológica. El ácido débil que resulta puede disolver la roca caliza y la piedra carbonatada por miles de años. Por otro lado, el agua percolada que penetra las cavidades llenas de aire puede emitir el dióxido de carbono en la atmósfera de la cavidad para luego precipitar la calcita mineral. Esta precipitación produce los **espeleotemas** o formaciones tales como **estalactitas**, **estalagmitas** y decoraciones de **travertina** (foto 15), con frecuencia muy bellas y atractivas (recuadro 8). Puesto que estas formaciones existen en un delicado balance con la composición química del agua subterránea que se percola, toda alteración de la vegetación y el suelo superficial puede afectar marcadamente su desarrollo debido a la dislocación del dióxido de carbono producido en los suelos de cubierta.

Las cavidades que se forman en la franja kárstica debido a la percolación del agua de lluvia tienden a ser de unos pocos metros, ya que por lo general esta agua se satura rápidamente con la calcita mineral. El agua puede moverse hacia abajo en un flujo disperso por las grietas y las aperturas en la estratificación, o a veces como pequeñas quebradas superficiales que se acumulan en las depresiones entre los mogotes o las lomas y penetran los sumideros pequeños. Eventualmente, estas aguas llegan a moverse lateralmente en la superficie freática para surgir como manantiales en las cavidades fluviales de mayor tamaño o en los valles de los ríos que fluyen desde la cordillera central y atraviesan las cavidades.

Las cavidades con las dimensiones transversales de mayor tamaño conocido son las que se forman por las quebradas y los ríos unidos en la roca no caliza antes de penetrar al karso. Típicamente las cavidades fluviales comienzan como una red de pasajes de disolución. A medida que las corrientes comienzan a fluir por los pequeños pasajes de disolución interconectados, introducen elementos abrasivos como el cuarzo y otros minerales duros derivados del desgaste de la roca volcánica, sobre todo la roca intrusiva de las montañas de la Isla. Estos granos, grava y limo silicificado cortan la caliza, que es relativamente blanda, y van ensanchando los cauces de las corrientes hasta crear pasajes, los cuales al cabo del tiempo se convierten en pasajes grandes. Se ha encontrado arena, grava y hasta guijarros de origen volcánico e intrusivo en el sistema de Camuy. Las quebradas y los ríos no solo transportan el sedimento abrasivo, sino que sus aguas no se saturan con la calcita mineral. Además, sus corrientes son mucho más copiosas que las diversas corrientes que percolan por la caliza debido a la lluvia. Por estas razones, las dimensiones de estas cavidades puede llegar en ocasiones hasta más de 30 m de diámetro.

Puerto Rico tiene algunas de las cavidades más grandes del mundo en los sistemas del río Camuy y del río Encantado. Esto no sólo se debe al gran tamaño de los ríos que las forman, sino también a su ubicación en el trópico. Las cavidades tropicales nunca han sufrido la dislocación o destrucción física que puede ocurrir en las latitudes más altas debido a la glaciación. Algunas cavidades tienen pasajes lisos, sin decoración, porque el agua fluye por ellos con tal rapidez que imposibilita la deposición.

Las cavidades de Puerto Rico también registran los antiguos niveles freáticos del karso. Todas las cavidades principales contienen más de

Foto 15. Las estalagmitas y estalactitas de esta cavidad reflejan el resultado de los procesos de disolución y precipitación en las cavidades. Foto de la Fundación de Investigaciones Espeleológicas del Karso Puertorriqueño.

Foto 16. Cascada en el sistema de cavernas del río Encantado, ejemplo de una cavidad de dos niveles. Foto de la Fundación de Investigaciones Espeleológicas del Karso Puertorriqueño.

un nivel formado mediante una combinación de levantamiento tectónico de la superficie kárstica y/o la erosión de los ríos (foto 16). Los cambios resultantes en la superficie de los acuíferos kársticos se reflejan en la producción de varias galerías de estratificación vertical, cada una de las cuales constituye un registro del nivel freático hace miles de años. Se puede determinar la edad de estos niveles mediante la aplicación de la radiometría al espeleotema o la técnica paleomagnética aplicada a los sedimentos de la cavidad. Ésta es una información muy valiosa ya que se puede usar para predecir la ubicación de recursos de agua subterráneos o la susceptibilidad a movimientos telúricos al analizar el ritmo de levantamiento de las cavidades. Desgraciadamente, la destrucción negligente de los espeleotemas de las cavidades o el movimiento del sedimento puede dañar esta información antes de que se pueda estudiar.

Existen además unas **cavidades verticales** muy estrechas en la franja kárstica. Se desconoce su origen, pero algunas se pueden deber al colapso y otras se cree que fueron formadas por la disolución (Monroe 1976). La mayoría mide unos pocos metros (hasta 10 m) de diámetro y alcanzan hasta 30 m. de profundidad. Monroe (1976) describe muchos otros tipos de depresiones en la zona caliza del Norte.

Diversidad Hidrológica

La franja kárstica contiene varios ríos y quebradas subterráneos, acuíferos, manantiales, cascadas, embalses, lagunas, charcas naturales y humedales de varias clases (figura 16). Estos sistemas son componentes importantes del ciclo de agua (figura 17). La configuración del ciclo hidrológico en la región muestra patrones diferenciados conforme a la naturaleza del terreno: volcánico, calizo o de humedales calizos costeros. La presencia de la caliza ha producido rutas alternas para el movimiento y almacenaje del agua subterránea, inexistentes en las zonas volcánicas (figura 17). Debido a la manera en que fluye el acuífero en esta región, es aparente que durante la época de sequía, la caliza es más efectiva en dirigir el agua hacia la zona costera que dirigir el agua hacia los ríos y quebradas (Giusti y Bennett 1976, Giusti 1978).

Ríos y Quebradas

Los ocho ríos superficiales principales que fluyen a través de la franja kárstica son - de oeste a este - el río Guajataca, el río Camuy, el río Tanamá, el río Grande de Arecibo, el río Grande de Manatí, el río Indio, el río Cibuco y el río de La Plata. La Caliza Aguada, de arcilla esquistosa, subyace la geología superficial al este del río Cibuco. Hay caliza en el subsuelo en un área que se extiende desde el río Cibuco hasta el río Grande de Loíza, incluyendo

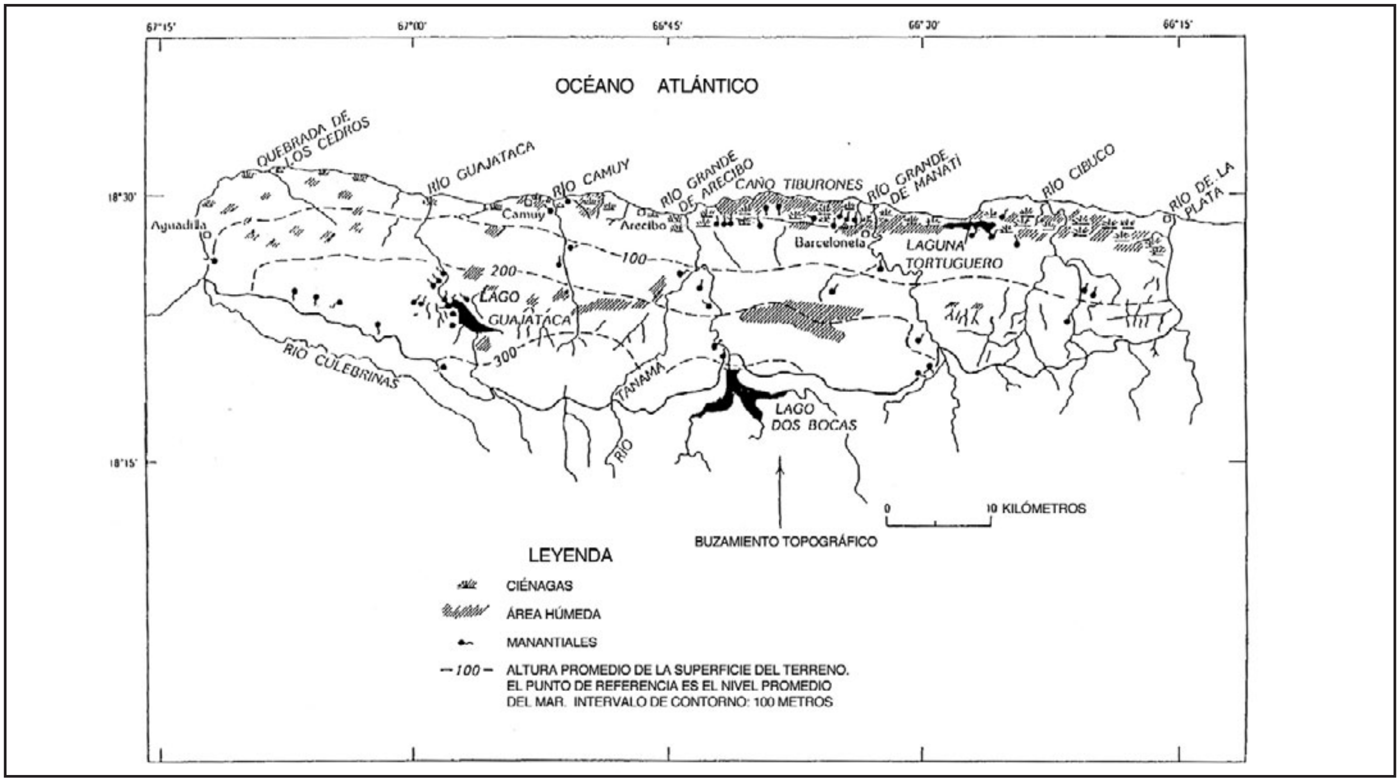

Figura 16. Sistemas hidrológicos: ríos principales, quebradas, embalses, lagunas y humedales de la franja kárstica de Puerto Rico. Estos rasgos son principalmente el producto de la precipitación desviada a través de la percolación subterránea en la franja kárstica. Los humedales de las planicies bajas dependen directamente de la precipitación y la escorrentía de las lomas calizas. El lago Dos Bocas intercepta la escorrentía de la zona volcánica al sur de la franja kárstica (Giusti 1978).

pequeños tramos del río de La Plata, el río Hondo, el río Bayamón y el río Piedras. El río Culebrinas al oeste y el río de La Plata al este, delimitan la franja kárstica. Varios embalses ubicados principalmente en las zonas volcánicas de las cuencas hidrográficas influyen en la frecuencia y magnitud de los eventos de descarga[5] en estos ríos. El resultado principal es que los flujos de estiaje y crecidas se reducen y en consecuencia, los eventos de formación de cauces se restringen a los periodos de crecida extraordinarios y se disminuye la capacidad de los ríos para sostener especies acuáticas migratorias durante los períodos de sequía. Los numerosos embalses también reducen la transportación de los sedimentos a estos ríos.

El substrato de las cabeceras de los ocho ríos principales de la franja kárstica es de naturaleza volcánica/plutónica. La densidad de drenaje superficial de la mayoría de estos ríos es mayor donde el substrato es volcánico/plutónico que en los lugares donde el substrato es calizo (figura 1). La mayor parte del drenaje en la franja kárstica es subterráneo, con grandes cavidades en forma de tubos, que pueden o no tener paredes lisas, o con una enorme red de pasajes interconectados de sólo unos pocos centímetros de diámetro. Monroe (1976) describió esta red como “pasajes interconectados espongiformes”. El río Grande de Manatí y el río Grande de Arecibo han abierto canales profundos en la roca caliza superficial, formando tres grandes polígonos con áreas respectivas de 902, 287 y 305 km^2, de oeste a este.

Varios de los ríos que tenían o tienen tramos subterráneos incluyen: el río Tanamá, que fluye a través de nueve túneles; el río Camuy, que fluye a través de las Formaciones Lares y Cibao; y el río Guajataca, que fluye por profundos cañones, que en un tiempo pudieron haber sido cuevas cuyos techos se desplomaron (Monroe 1976) o **sumideros colapsados** (Giusti 1978).

La descarga de algunos ríos cambia a medida que atraviesan la franja kárstica (Monroe 1976). El caudal del río Camuy aumenta por un factor de 4.5 al penetrar la franja kárstica. Los manantiales y afluentes aumentan el caudal del río Guajataca en su travesía por la zona kárstica (Monroe 1976). En algunos casos, el caudal puede disminuir si es capturado por el drenaje subterráneo. Giusti y Bennett (1976) observaron que el caudal de base por unidad de área de la cuenca hidrográfica en los ríos y quebradas de la zona kárstica era menor que en los ríos y quebradas de roca volcánica. Por lo tanto, la relación del caudal de base al caudal total

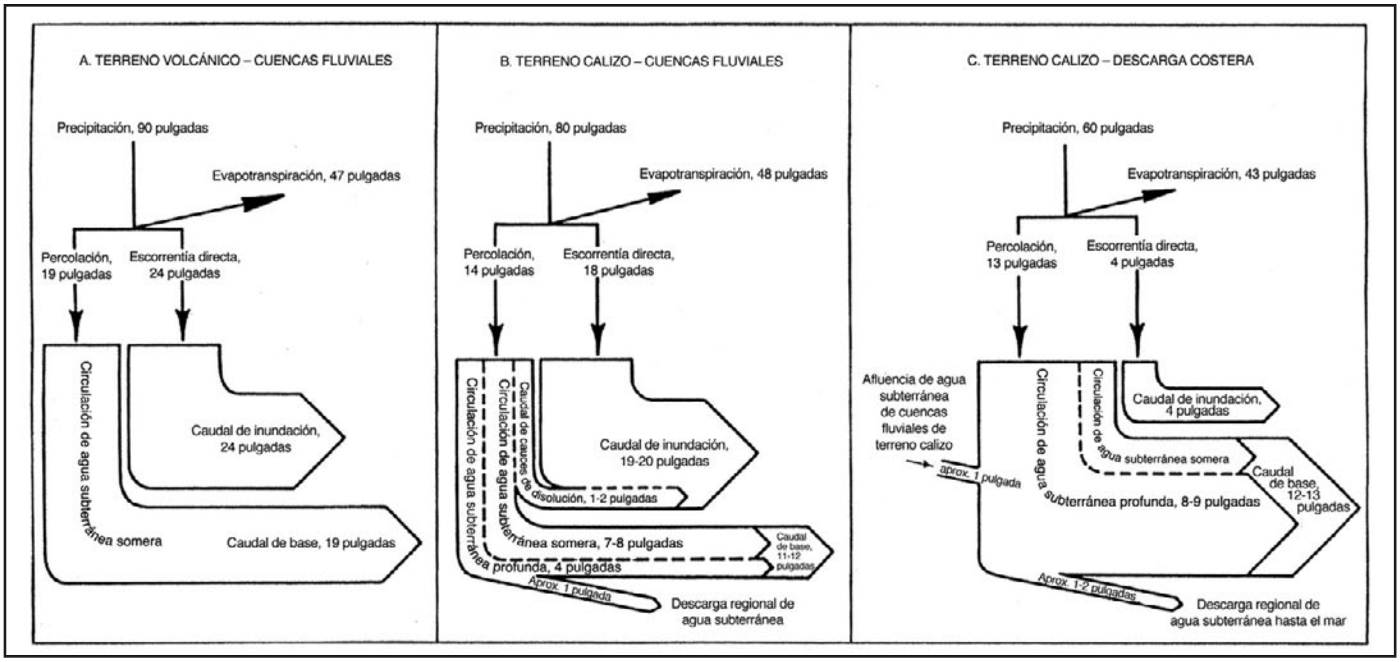

Figura 17. Promedio estimado de las condiciones hidrológicas anuales y de los patrones teóricos de caudal para las cuencas fluviales en las terrazas volcánicas y calizas (Giusti y Bennett 1976).

[5] El término descarga se usa indistintamente con el término caudal.

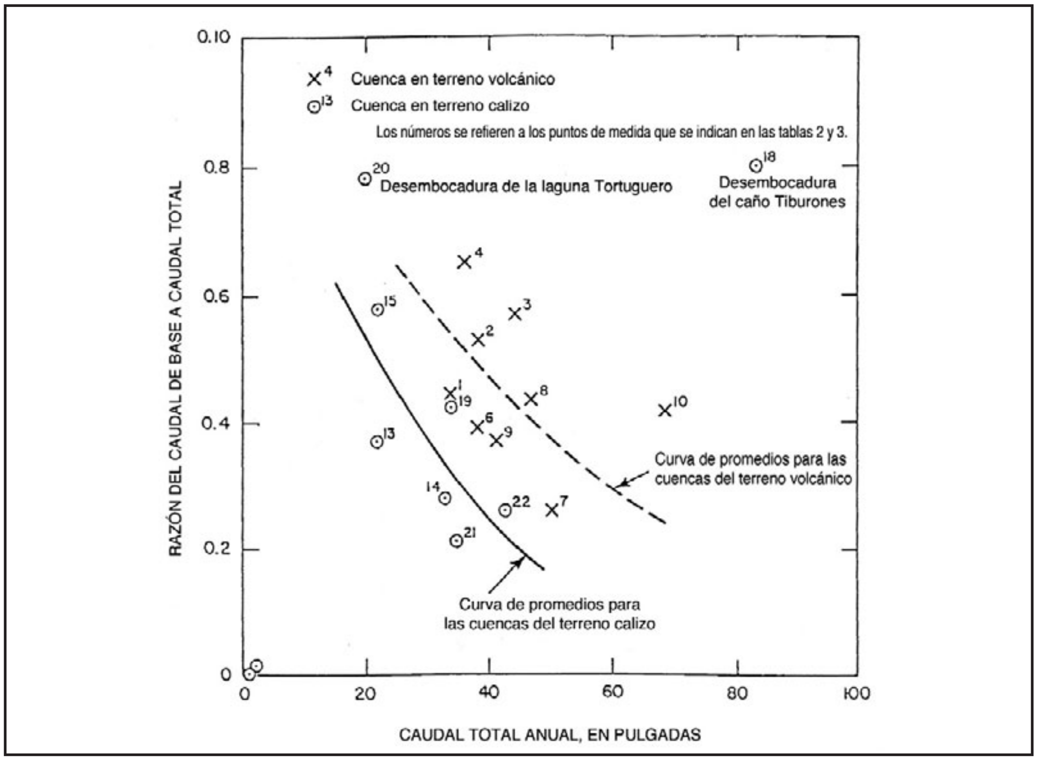

Figura 18. Comparación de la razón del caudal de base a caudal total frente al caudal anual total de las cuencas fluviales en las estructuras geológicas volcánicas y calizas (Giusti y Bennett 1976). Para hacer la conversión a milímetros, se multiplican las pulgadas por 25.4.

ser de mayor en los ríos y arroyos de las zonas de roca volcánica que en las de la roca caliza (figura 18). Esto significa que el caudal resultante de las escorrentías superficiales es proporcionalmente mayor en las cuencas calizas que en las volcánicas debido a la contribución del agua subterránea durante períodos de mucha precipitación (Giusti y Bennett 1976).

Río Culebrinas -- Es un río de grandes meandros, de unos 54 km de extensión. Su cabecera se origina sobre unos 400 m de altura y el río descarga en la costa oeste. Los centros urbanos de los municipios de Aguada, Moca y San Sebastián están dentro de la cuenca hidrográfica de este río. El río Culebrinas fluye casi paralelo a la delimitación entre la zona caliza y la volcánica; es decir, sirve de delimitación al sur para la zona caliza del Norte. Todos los principales afluentes que descargan en el río Culebrinas desde el norte traen agua mayormente de la Formación San Sebastián, pero también desde tan al norte como desde la Formación Lares hasta la Formación Cibao. De hecho, varios de los afluentes que fluyen desde el norte hacia el río Culebrinas se originan como manantiales. Todos los afluentes del río Culebrinas que fluyen desde el sur traen agua del substrato volcánico. La planta de filtración del municipio de San Sebastián, administrada por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico, tiene dos tomas, una sobre substrato calizo y otra sobre el substrato volcánico. La Formación San Sebastián se caracteriza por sus valores relativamente bajos de conductividad hidráulica y la proporción de agua superficial que contribuye a la formación de cavidades en el suelo es menor en comparación con las cuencas hidrográficas donde la caliza es de la Formación Aguada o de la Formación Aymamón. El río Culebrinas fluye a lo largo del limite sur de la zona caliza del Norte y atrae agua subterránea a su cuenca hidrográfica desde la franja caliza debido a diferencias en el nivel freático.

Río Guajataca -- Las cabeceras del río Guajataca tienen substrato volcánico y plutónico. El cauce principal comienza su rumbo hacia el sur, por unos 40 km de trayectoria, a una altura de sobre 400 m. Fluye por todas las principales formaciones calizas de la franja kárstica. De los ríos del norte, el río Guajataca y el río Camuy presentan la mayor dificultad en la delimitación de sus cuencas hidrológicas. Más del 90 por ciento de la cuenca hidrográfica del río Guajataca es de substrato calizo, dividido en partes casi iguales de Formaciones Aymamón, Cibao y Lares, con una proporción menor sobre la Formación Aguada. Los municipios de Lares y Quebradillas están en la cuenca hidrográfica del río Guajataca.

Río Camuy -- Este río nace de tres afluentes, el río Piedras, el río Ángeles y el río Criminales, sobre substrato volcánico, y fluye unos 2.7 km hacia el norte desde una altura de aproximadamente 600 m. Luego de un corto tramo en donde fluye sobre la caliza, se convierte en un río subterráneo en el contacto de la Caliza Lares y reaparece unos 2.8 km río abajo - medidos en línea recta - en la Formación Cibao y luego mantiene su rumbo hacia al norte por unos 22.3 km hasta el océano. Los centros urbanos de los municipios de Camuy y Hatillo quedan en su cuenca hidrográfica superficial.

Río Grande de Arecibo -- Este río de grandes meandros, presenta numerosos cauces abandonados a lo largo de su trayectoria. Algunos piensan que fue un río subterráneo que fluía hacia el caño Tiburones. Casi una tercera parte de su cuenca hidrográfica piriforme es de substrato calizo. El río discurre unos 60 km hasta el Océano Atlántico desde su origen a más de 800 m de altura. Fluye unos 23 km sobre el substrato calizo y recibe agua del río Tanamá, que también se extiende unos

19.6 km sobre caliza. Los centros urbanos de los municipios de Adjuntas, Jayuya, Utuado y Arecibo están en su cuenca hidrográfica. Los principales afluentes al río Grande de Arecibo, tales como el río Tanamá, arrastran agua desde 1,000 m sobre el nivel del mar. El río Grande de Arecibo experimenta un cambio abrupto de substrato de roca volcánica/plutónica a roca caliza justo río abajo del embalse de Dos Bocas (foto 17).

El río Grande de Arecibo es la fuente principal de recarga de su valle aluvial (foto 18) (Quiñones Aponte 1986). El valle contiene un acuífero no confinado conectado hidráulicamente con las formaciones calizas colindantes y el río, de manera que si el agua se extrae en exceso del río durante periodos de estiaje, se disminuye la recarga disponible al acuífero aluvial. El valle es hidrológicamente complejo, debido a que el río Tanamá también descarga en el valle; y además es geológicamente complejo ya que se compone de dos subcuencas delimitada en base a la geología subyacente (Quiñones Aponte 1986). El río Grande de Arecibo y el río Tanamá pierden parte de su caudal al acuífero durante la mayor parte del año (Quiñones Aponte 1986). La pérdida promedio de agua al aluvión entre las estaciones 27750 y 0290 del Servicio Geológico de EE.UU. (USGS, por sus siglas en inglés) es de aproximadamente 60,560 m^3/d (16 mgd) más 43,906 m^3/d (11.6 mgd) perdida a los acuíferos de las Formaciones Aguada y Aymamón.

Río Grande de Manatí -- Este río tiene una cuenca hidrográfica piriforme, definida por una alta densidad de drenaje superficial sobre substrato volcánico y una baja densidad de drenaje sobre substrato de roca caliza. Los centros urbanos de los municipios de Orocovis, Ciales, Manatí y Barceloneta quedan en su cuenca hidrográfica. El río nace a unos 800 m sobre el nivel del mar, pero recibe agua desde 1,000 m sobre el nivel del mar y se extiende aproximadamente 80 km hasta el océano, incluyendo unos 33 km sobre substrato calizo. Su substrato es volcánico en la mayor extensión de su trayectoria; cuando el substrato es calizo, las aguas superficiales se concentran en el cauce principal y drenan hacia el norte sobre todas las formaciones calizas de mayor tamaño. La extensión de los depósitos aluviales en todo su cauce mayor, la forma de su cuenca hidrográfica, así como la distribución de las densidades de drenaje, son muy similares a las del río Grande de Arecibo.

Río Cibuco -- Desde su origen a una altura de 700 m, con substrato volcánico, este río atraviesa unos 36.5 km hasta el océano, 10 km de éstos sobre caliza. Los centros urbanos de los municipios de Corozal, Morovis y Vega Baja están dentro de la cuenca hidrográfica, compuesta en más de 50 por ciento de roca caliza. La mayor parte de las Formaciones Aguada y Aymamón están cubiertas de depósitos no consolidados en el cauce mayor del río Cibuco. El aluvión en el valle de este río alcanza una profundidad máxima de 85.3 m. Los

Foto 17. Embalse Dos Bocas, en la zona interfacial de la zona caliza y la zona volcánica. Obsérvese el karso del entorno. Foto de A. García Martinó.

Foto 18. Río Grande de Arecibo y su valle rodeado de colinas de caliza. Foto de L. Miranda Castro.

valores de **transmisividad** medidos alcanzan 7,620 m^2/d cerca de la confluencia del río Indio con el río Cibuco y a más de 150,000 m^2/d en la divisoria entre el río Cibuco y el río de La Plata, justo al norte del acuífero de Vega Alta.

Río de La Plata -- Es el río más largo de Puerto Rico, aproximadamente 97.4 km de largo, y se extiende desde una altura de 900 m hasta el océano. Menos del 25 por ciento de la cuenca hidrográfica es de substrato calizo. Su cuenca hidrográfica incluye los municipios de Dorado, Toa Baja, Toa Alta, Naranjito, Comerío, Barranquitas, Cidra, Aibonito y Cayey.

Los tramos inferiores de los ríos de la costa norte se convierten en estuarios antes de llegar al océano. El agua del mar penetra río arriba en forma de cuña de agua salada. Por ejemplo, se detectó una cuña de agua salada a 2.8 km río arriba de la desembocadura del río Cibuco y a 4.8 km río arriba de la desembocadura del río de La Plata (Torres González y Díaz 1984). En el río Grande de Manatí, la cuña de agua salada puede penetrar 10.9 km cuando hay cero descarga (Gómez Gómez 1984). La distancia que penetra la cuña es directamente proporcional al nivel del mar e inversamente proporcional a la descarga de agua dulce de los ríos.

Acuíferos

La zona caliza del Norte contiene dos de los acuíferos más productivos de la isla. El acuífero superior se encuentra dentro de las Calizas Aymamón y Aguada y de los depósitos aluviales de la costa. El acuífero inferior ocurre dentro de varios miembros de la Formación Cibao y la Caliza Lares y está confinado en la parte cerca de la costa. La unidad confinante es localmente semi-permeable en la zona metropolitana de San Juan. El acuífero inferior adquiere su mayor grosor y transmisividad en la parte norte-central de la isla en la región de Barceloneta (figura 19). Se desconoce cuanto se extiende el acuífero inferior al oeste del río Grande de Arecibo (Rodríguez Martínez 1995). Estos dos acuíferos cubren un área de 1,761 km^2, es decir, un 19.7 por ciento del área de Puerto Rico, y representan el 64 por ciento del total del área de los acuíferos de la isla (Molina Rivera 1997). La relación hidráulica entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas de la zona caliza del Sur con sus depósitos aluviales no está tan bien definida como en la zona caliza del Norte.

El acuífero de la costa norte se caracteriza por grandes variaciones en la **conductividad hidráulica**, tanto lateral como vertical (tabla 5). Se han calculado valores tan altos como de 2,042 m/d y tan bajos como de 0.04 m/d para el acuífero de la costa norte (Giusti y Bennett 1976). Sin embargo, la conductividad hidráulica promedio de la unidad hidrogeológica disminuye con la profundidad (tabla 5).

La transmisividad también varía mucho en la franja kárstica (tabla 6). Los

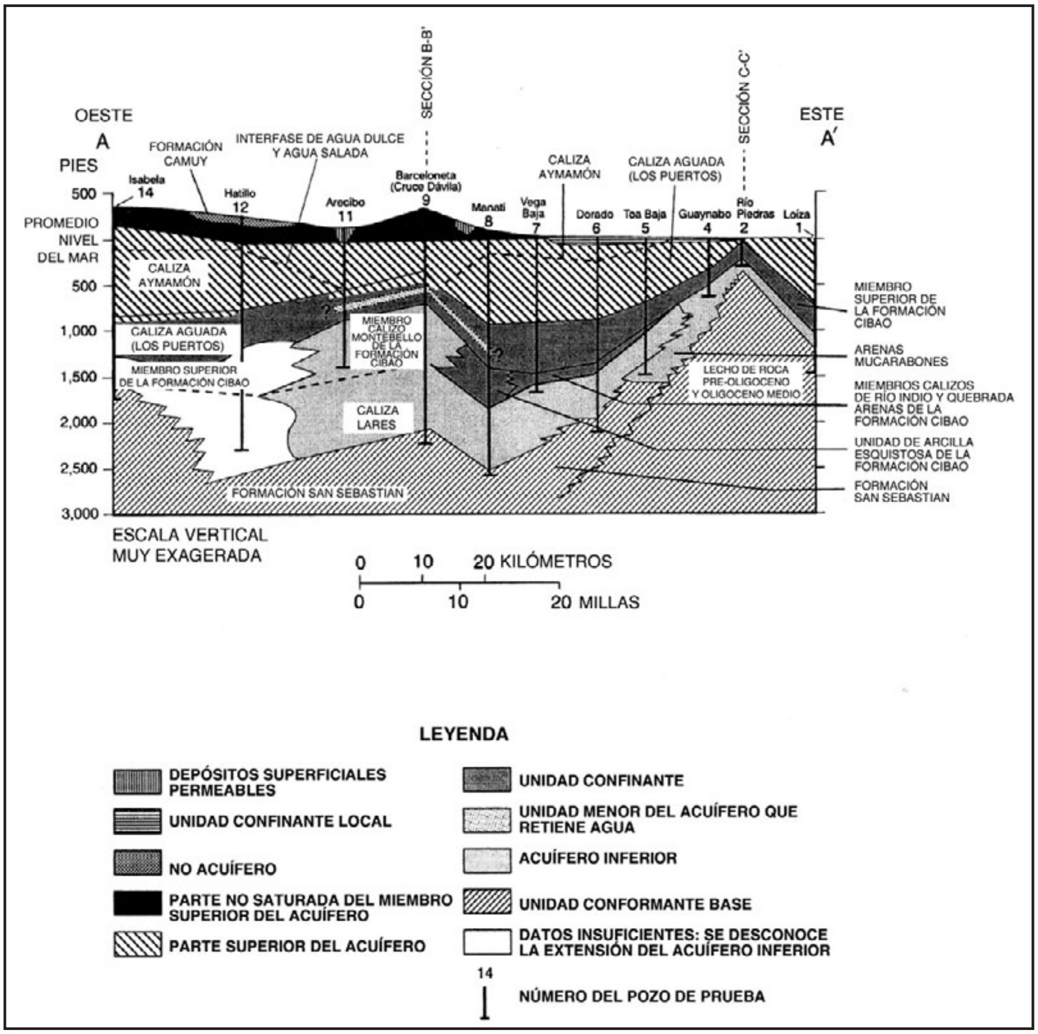

Figura 19. Corte hidrogeológico del acuífero de la costa norte entre Isabela y Loíza (Rodríguez Martínez 1995). Para convertir la elevación a metros, se multiplican los pies por 0.3048.

acuíferos aptos para abastos de agua deben tener una transmisividad de 1,296 m^2/d o más (White 1988). En el acuífero Aymamón, se han registrado valores de transmisividad mayores de 185,800 m^2/d, correspondientes a zonas cavernosas localizadas (Torres González 1985). En el acuífero superior los valores de transmisividad varían mayormente desde 18.6 a más de 26,012 m^2/d y en general son más altos en la zona entre el río de La Plata y el río Grande de Arecibo, donde los valores han superado los 9,290 m^2/d en seis lugares (Rodríguez Martínez 1995).

Los valores de transmisividad más altos estimados para el acuífero inferior son los de la zona norte-centro de Puerto Rico, donde la Caliza Lares y el miembro de la Caliza Montebello de la Formación Cibao tiene valores que alcanzan 46.5 y 334 m^2/d, respectivamente (Rodríguez Martínez 1995).

El acuífero de la costa norte se regarga por medio de infiltración de precipitación directa y de corrientes superficiales. En las zonas de mogotes, es muy limitada la recarga mediante infiltración directa a través de los depósitos de la arena de manto relativamente impermeables o la superficie de caliza cementada de los mogotes. La recarga se debe principalmente a la escorrentía durante eventos significativos de precipitación (Troester 1999). La escorrentía superficial de los mogotes fluye rápidamente hacia los puntos de absorción y las grietas de disolución alrededor de la base del

Tabla 5. Conductividad hidráulica y descarga de la zona caliza de la costa norte (adaptado de Giusti y Bennett 1976). Las formaciones calizas se muestran en orden creciente de profundidad estratigráfica. La descarga se informa en millones de metros cúbicos por día (Mm^3/d) y millones de galones por día (mgd).

Acuífero	Ancho (km)	Conductividad hidráulica (m/d)	Descarga (Mm^3/d)	(mgd)	(% del total/km)	(% del total)
	12.9	Dorado – Vega Baja	0.073	19.2	18.2	15.5
Aymamón		82.3				
Aguada		20.4				
Cibao		1.2				
Lares		0.4				
	16.1	Vega Baja – Manatí	0.077	20.4	16.3	16.4
Aymamón		82.3				
Aguada		4.1				
Cibao		0.4				
Lares		0.2				
	17.7	Caño Tiburones	0.250	66.1	48.0	53.2
Aymamón		163.1				
Aguada		26.5				
Cibao		2.9				
Lares		0.2				
	12.9	Arecibo – Camuy	0.032	8.4	8.4	6.8
Aymamón		24.3				
Aguada		1.6				
Cibao		0.8				
Lares		0.2				
	12.9	Camuy – Guajataca	0.016	4.1	4.1	3.3
Aymamón		16.5				
Aguada		1.2				
Cibao		0.4				
Lares		0.2				
	19.3	Guajataca – Costa Oeste	0.023	6.0	4.0	4.8
Aymamón		20.4				
Aguada		2.0				
Cibao		0.4				
Total			0.470	124.2	100	100

Tabla 6. Valores de transmisividad para algunas unidades del acuífero calizo de la costa norte (Torres González y Wolansky 1984). La Formación San Sebastián no forma acuíferos.

Unidades Geológicas	Acuíferos Asociados	Transmisividad (m^2/d)
Depósitos aluviales	No confinado	93 a 4645
Formación Camuy	No confinado	93 a 279
Caliza Aymamón	No confinado	465 a 4645
Caliza Aguada	No confinado	186 a 1858
Formación Cibao	No confinado en los afloramientos, confinado en los buzamientos bajos	279
Caliza Lares	No confinado en los afloramientos, confinado en los buzamientos bajos	929
Formación San Sebastián	No es un acuífero	---

mogote y recarga el acuífero. La escorrentía en los valles entre los mogotes también fluye hacia los sumideros y recarga el acuífero. Los niveles de agua en los pozos de la región de los mogotes responden de inmediato a los eventos de precipitación (figura 20). Los estimados de recarga neta varían desde 0 a 495 mm/a y el promedio es de unos 150 mm/a en toda la extensión del acuífero (Troester 1999). Para las zonas de mogotes con drenaje interno, estos valores varían desde 250 a 495 mm/a.

El acuífero de la costa norte se subdividió en seis regiones principales definidas por los principales ríos subaéreos. Se calculó el caudal total del agua subterránea para todo el acuífero de la costa norte usando los valores de conductividad hidráulica, el grosor del acuífero y los gradientes de carga en cada región (tabla 5) (Giusti y Bennett 1970). Se estimó la descarga en unos 0.47 Mm^3/d [millones de m^3 al día] ó 124 mgd. Este flujo ocurre a través de las formaciones calizas, pero particularmente como caudal de base de los ríos y quebradas, flujo de manantiales y filtracion hacia el mar o las zonas cenagosas. La región de caño Tiburones recibe más del 50 por ciento de la descarga total en el acuífero de la costa norte seguido por la región Vega Baja-Manatí. La razón principal del predominio de la región del caño Tiburones es la conductividad hidráulica relativamente alta, 163 m/d, del acuífero superior en la Caliza Aymamón. La importancia relativa de la región Dorado-Vega Baja aumenta cuando se expresan los valores del caudal en función del ancho del acuífero (tabla 5).

Giusti (1978) revisó estos números y redujo la cantidad calculada de la descarga del acuífero a unos 0.40 Mm^3/d ó 105 mgd. La reducción se debió a que los valores de conductividad hidráulica que se usaron eran menores en comparación con los que se detallan en la tabla 5. El balance promedio hidrológico para la franja kárstica según Giusti (1978) era de 1,550 mm de precipitación, 1,100 mm de evapotranspiración y 650 mm de descarga al océano. Este balance tiene un déficit de 200 mm, compuesto de escorrentía desde las zonas altas. En los tres balances de la figura 17 se ilustra la variación dentro de la región kárstica. Los valores de los balances se calcularon a la mejor precisión posible e irán cambiando a medida que continúen las investigaciones hidrológicas en el área kárstica. Giusti y Bennett (1976) también compararon los valores del balance hidrológico para las cuencas de substrato volcánico con las de substrato calizo (tabla 7). El almacenaje de agua subterránea y los caudales de base de los ríos tienden a ser mayores en las zonas de substrato calizo que en las de substrato volcánico. Los valores aparentemente anómalos para caño Tiburones se debieron a las modificaciones artificiales hechas a su drenaje en los proyectos de reclamación. El haber bajado el nivel freático por debajo del nivel del mar ha causado la infiltración de agua de mar en el acuífero de agua dulce.

El sector menos desarrollado del acuífero de la costa norte en función de bombeo es el área occidental entre el río Camuy y Aguadilla (Tucci y Martínez 1995). En esta región, el agua subterránea es profunda y las fuentes de abasto de agua provienen del embalse en el Lago Guajataca (recuadro 10). El acuífero inferior en esta región es fragmentado y no muy productivo. El acuífero superior es más accesible, aunque no se utiliza extensamente. El movimiento del agua subterránea en esta región proviene desde las zonas altas al sur hacia el norte y el oeste, y localmente hacia las quebradas. Una divisoria importante de agua subterránea se extiende desde el sureste al noroeste de la región y separa el flujo hacia la franja kárstica del flujo hacia el río Culebrinas al suroeste.

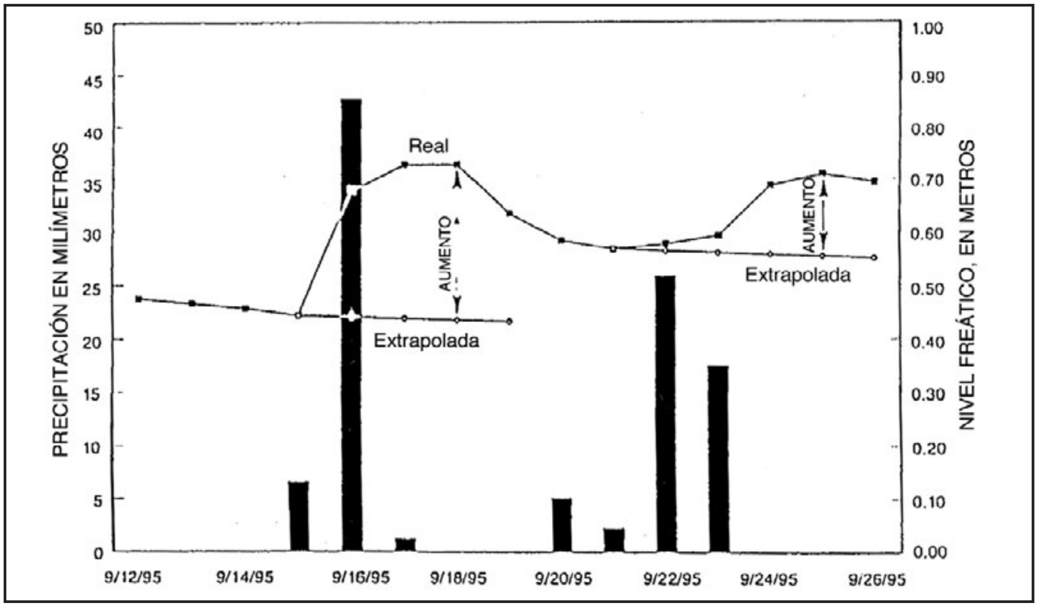

Figura 20. Reacción del nivel freático a la precipitación en la zona de Dorado (Troester 1999).

La región comúnmente conocida como el acuífero de Vega Alta, delimitada por el río Indio al oeste y río de La Plata al este (unos 13.7 km), está ubicada en el acuífero de la costa norte. Sepúlveda (1999) dividió este acuífero en cinco regiones fisiográficas: la serranía kárstica del sur, la meseta kárstica, los valles aluviales, el valle del karso cubierto por depósitos de arena de manto y la planicie costera. El humedal de Ciénaga Prieta es parte integral del acuífero y es el principal cuerpo de agua superficial formado por el acuífero de Vega Alta. Antes de 1930 aproximadamente 15 m^3/s de agua subterránea drenaba hacia la ciénaga, pero en 1995 el caudal era de 4 m^3/s. Durante el mismo plazo, la **superficie potenciométrica** de la costa disminuyó aproximadamente un metro (Gómez Gómez y Torres Sierra 1988). Parte del acuífero de Vega Alta, subyacente al valle del karso de Vega Alta, fue designado como sitio de Superfondo por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos debido a la presencia de compuestos volátiles - principalmente tricloroetileno, sustancia que se cree que es carcinógena para los humanos.

Román Más y Lee (1987) analizaron la evolución geoquímica de las aguas dentro del acuífero calizo de la costa norte (recuadro 3). Por lo general, el sulfato y el magnesio disueltos, el pH y los isótopos de carbono 13 aumentaron hacia la costa. La cantidad total de carbono y calcio inorgánicos era

Tabla 7. Reservas de agua subterránea, caudal de base y extensión de descarga de las cuencas hidrográficas en los terrenos volcánicos y calizos. (Giusti y Bennett 1976). Celdas vacías = no hay datos disponibles.

Cuenca hidrográfica	*Reserva de Agua Subterránea (cm)*	*Caudal de base ($m^3/s.km^2$)*	*Area de Drenaje (km^2)*
Terreno Volcánico			
Alto Río Guajataca	10.2	0.012	8.3
Alto Río Camuy	0	0.016	19.7
Río Criminales	-15.2	0.021	11.7
Alto Río Tanamá	5.1	0.019	47.7
Río Grande de Arecibo más abajo de Dos Bocas	5.1		429.3
Río Cialitos	12.7	0.012	44.0
Alto Río Grande de Manatí	12.7	0.010	331.5
Río Unibón	-20.3	0.016	13.7
Alto Río Cibuco	12.7	0.012	39.1
Río Mavilla	-45.7	0.023	24.6
Terreno Calizo			
Quebrada Los Cedros	53.3		37.8
Río Guajataca hasta el lago Guajataca	22.9		78.7
Río Guajataca hasta el océano	25.4	0.007	76.4
Bajo Río Camuy	2.54	0.008	169.9
Bajo Río Tanamá	28.0		101.5
Bajo Río Grande de Arecibo	63.5		76.1
Cauce sur (dos lugares)	22.9	<0.0001	53.4
Desembocadura del caño Tiburones -	182.9	0.051	46.4
Bajo Río Grande de Manatí	-20.3	0.011	173.5
Desembocadura de la laguna Tortuguero	5.1	0.016	43.5
Bajo Río Cibuco	-7.6	0.006	170.2
Río Lajas	-22.9	0.008	21.8

Recuadro 10. Distrito de Riego de Isabela.

En 1928, se construyó una represa en el río Guajataca para formar el embalse de Guajataca como parte del Distrito de Riego de Isabela (figura B10-1). El embalse de Guajataca, con una capacidad original de 45.2 millones de metros cúbicos, es la única represa grande construida sobre substrato calizo y tiene la menor pérdida de reserva debido a sedimentación entre las represas de la isla, un 0.1 por ciento al año (Morris y Fan 1997). El distrito de riego se diseñó y se construyó para regar los terrenos usados para la producción de caña, pero fracasó debido a la pérdida excesiva de agua por medio de la infiltración (véase el ejemplo 1, recuadro 14). Hoy día, el embalse y sus cauces asociados se usan como fuente de agua potable. El agua se lleva a seis plantas de filtración con una capacidad total de filtración de 84,400 m^3 al día. Sin embargo, en 1938 se extraían 213,700 m^3/d del embalse. La pérdida de agua debido a la infiltración por la caliza porosa continúa hasta hoy, desde la construcción del embalse. En mayo de 1998, el embalse llegó a un nivel de estiaje crítico, lo cual creó una escasez de agua para unas 250,000 personas en los municipios de San Sebastián, Isabela, Aguadilla, Aguada, Moca y Rincón.

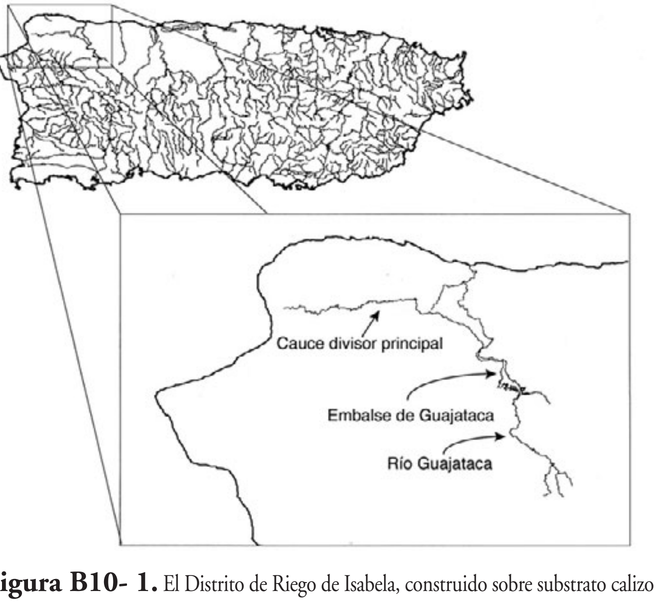

Figura B10- 1. El Distrito de Riego de Isabela, construido sobre substrato calizo en 1928. El recuadro 14 contiene la narrativa del fracaso de este distrito para riego.

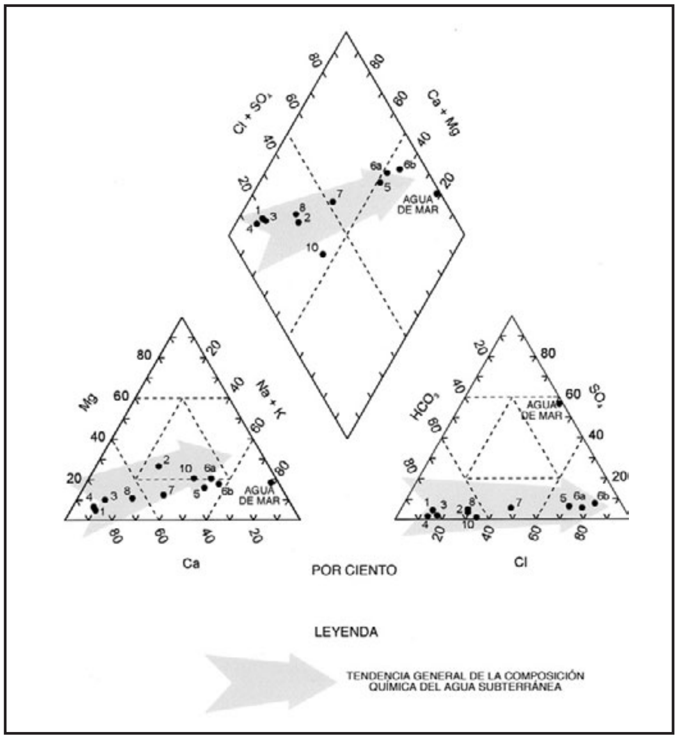

Figura 21. Diagrama de Piper que ilustra la tendencia general de la composición química del agua subterránea según las muestras tomadas en la zona de Dorado (Troester 1999).

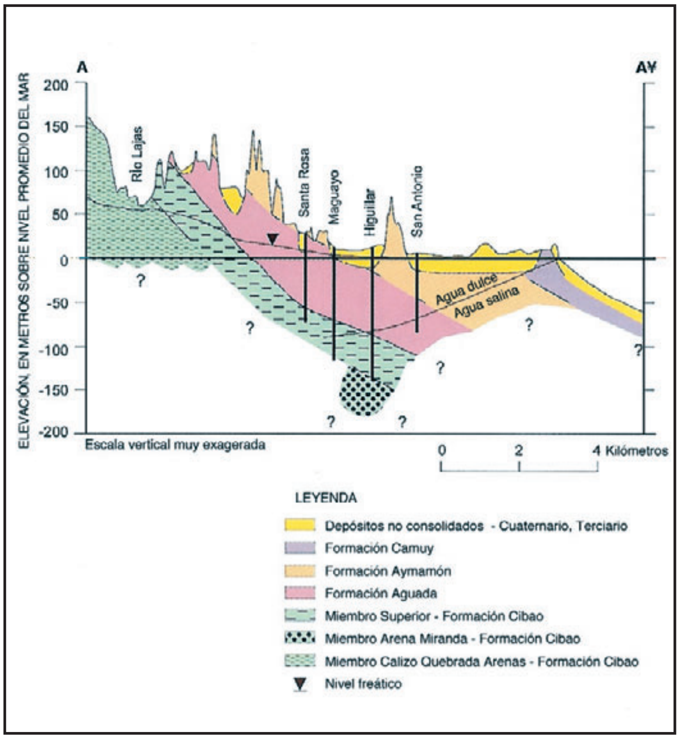

Figura 22. Corte transversal del acuífero en el área de Dorado, donde se destaca la mezcla de agua salada y agua dulce, además de la variación del nivel freático en los diversos estratos calizos (Troester 1999).

menor dentro de las partes de agua dulce del acuífero. El dióxido de carbono se disuelve en el agua y reacciona con ella a medida que percola por el suelo. Este proceso es seguido por la disolución de calcita a medida que el agua recarga el acuífero (figura B3-1). Como resultado de la precipitación de calcita y la disolución de yeso y dolomía, el dióxido de carbono puede desgasificarse a medida que el agua baja por el gradiente del acuífero artesiano. En el acuífero superior, la continua recarga de aguas saturadas de ácido carbónico mantiene la disolución de los minerales carbonatados. La mezcla de agua de mar con el agua dulce subterránea domina la composición química cerca de la costa.

El agua del acuífero inferior es dulce en gran parte de la zona, pero salobre en algunas partes cerca de San Juan y Guaynabo. La calidad del agua de los dos acuíferos de la costa norte es bastante similar (Zack y otros 1986). La concentración de sólidos disueltos aumenta a lo largo del **gradiente hidráulico**. En general, la concentración es menor de 500 mg/L, pero se aproxima a este valor en las áreas donde hay intrusión salina, donde se afecta la viabilidad del uso del agua para riego y para abasto de agua potable. La concentración de nitratos es menor del límite detectable y la concentración de sulfatos es baja en comparación con los otros acuíferos de la isla. Giusti y Bennett (1976) observaron que la calidad de las aguas de los ríos es similar a la de los acuíferos, particularmente durante condiciones de flujo base.

Los **diagramas de Piper** demuestran la manera en que a medida que el agua subterránea fluye desde el acuífero superior hacia el Océano Atlántico, las reacciones químicas entre el agua y los minerales del acuífero cambian la composición química del agua. Esto resulta en un aumento en la concentración de sólidos disueltos. El agua subterránea en el acuífero cambia de una solución de **bicarbonato** de calcio en las áreas de recarga a una solución de cloruro de sodio cerca de la costa (figura 21), debido a la mezcla con el agua de mar (figura 22). Los cambios en el nivel freático a lo largo del corte transversal del acuífero ilustrados en la figura 22 reflejan los cambios en la conductividad hidráulica de los varios elementos de la caliza (Troester 1999). A medida que cambia la conductividad hidráulica, también cambia la mezcla del agua con los componentes químicos de la caliza, resultando en cambios en su calidad.

Embalses, Lagunas, Charcas y Humedales

La zona caliza del Norte comprende muchos tipos de embalses, lagunas, charcas y humedales (figura 23). Estos varían en tamaño desde el caño Tiburones y el lago Guajataca, respectivamente el humedal y el embalse más grandes de la región, hasta micro-humedales al pie de los mogotes o pequeñas charcas en los valles entre los mogotes. La salinidad de estos sistemas varía grandemente también, desde manglares en agua salada hasta estuarios mixtos de agua dulce y agua de mar y una laguna costera de agua dulce, la laguna Tortuguero. Años atrás, el caño Tiburones

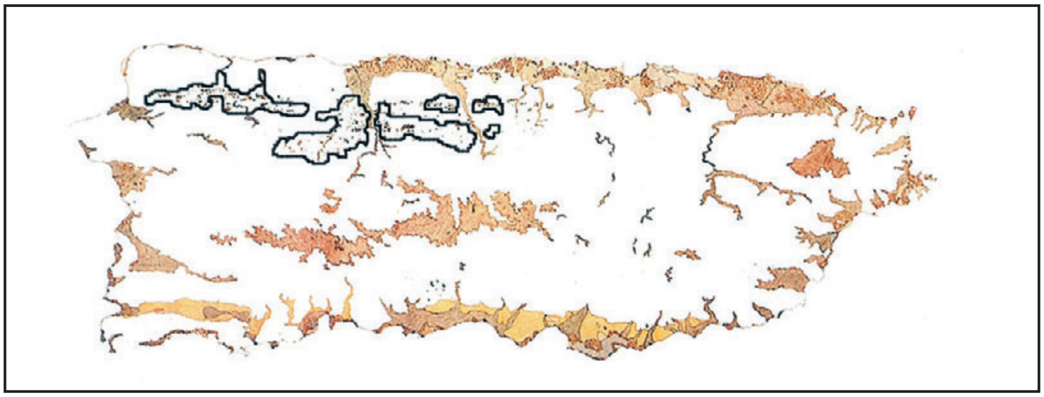

Figura 23. Mapa de los humedales en Puerto Rico. Modificado de Del Llano (1988). Las líneas gruesas delimitan el área que se propone que se transfiera al dominio público.

tenía un patrón hidrológico similar al de la laguna Tortuguero: lo alimentaba el acuífero del norte y descargaba agua dulce al océano (Giusti 1978). Pero los cambios hidrológicos hechos al caño, reversaron el movimiento de agua y ahora el agua de mar entra al caño.

El caño Tiburones es un cuerpo de agua superficial delimitado al oeste por el río Grande de Arecibo y al este por el río Grande de Manatí; unos 46.6 km^2 se encuentran sobre la Caliza Aymamón. Los manantiales abundan a sus alrededores debido a su ubicación debajo del nivel del mar. Los depósitos superficiales son mayormente aluviales y sirven de lindero para el caño Tiburones. En condiciones naturales, el caño Tiburones recibía las escorrentías directamente del río Grande de Manatí y del río Grande de Arecibo. En las condiciones actuales, el caño Tiburones pierde casi toda la escorrentía afluente por los canales de desvío que se construyeron como parte de un plan de desarrollo agrícola. El volumen promedio de agua dulce que se bombeaba al océano era de aproximadamente unos 3.15 m^3/s. Antes del drenaje artificial del caño Tiburones, se descargaban unos 0.57 m^3/s al océano. El nivel freático de este humedal descendió por debajo del nivel del mar debido al constante bombeo (foto 19) y el humedal sufrió de intrusión salina (Zack y Class Cacho 1984). La intrusión salina en el caño Tiburones se adentra por cuatro puntos principales de la costa del norte, lo cual produce zonas de aguas salinas y salobres: al oeste de Punta Caracoles, al este de Punta Las Tunas, al oeste de Palmas Altas y al este de Palmas Altas (Raúl Díaz 1973).

La laguna Tortuguero (foto 20) tiene un área superficial de 2.24 km^2, un volumen de unos 2.68 m^3 y una profundidad promedio de 1.2 m (Quiñones Márquez y Fusté 1978). El sedimento del fondo tiene una profundidad promedio de 2 m y su volumen es el doble del volúmen de las aguas de la laguna. El flujo anual de aguas superficiales y subterráneas a la laguna es casi seis veces mayor que el agua captada de la precipitación anual. La laguna descarga aproximadamente 20 Mm^3/a al océano. En 1975, la calidad del agua era excelente, con un bajo contaje bacteriano. La laguna se conoce también como un lugar excelente para la pesca.

Además del caño Tiburones y la laguna Tortuguero, la descarga del acuífero del norte produce muchos de los otros humedales en la región (foto 21), tal como la región

Foto 19. Casa de bombas en Caño Tiburones, Arecibo, Puerto Rico. Foto de J. Colón.

Foto 20. Laguna Tortuguero. Foto de L. Miranda Castro.

cenagosa costera entre Arecibo y Dorado (Giusti y Bennett 1976). Los terrenos cenagosos de la región incluyen los humedales de arena blanca en los alrededores de la laguna Tortugero, los cuales albergan una concentración inusitada de especies endémicas de plantas, incluyendo muchas plantas carnívoras raras. La descarga a estos sistemas ocurre tanto mediante rezumaderos como por percolación. Giusti (1978) calculó que el 75 por ciento de la descarga del acuífero ocurrió tierra adentro de los humedales y de ahí, las aguas fluyeron al océano por la laguna Tortuguero y el caño Tiburones. El restante 25 por ciento de la descarga del acuífero fluía directamente al lecho del océano en una zona de unos pocos cientos metros de ancho. Los humedales costeros se caracterizan por el balance hidrológico particular ilustrado en la figura 17-C.

Manantiales y Cascadas

Por toda la franja kárstica abundan los manantiales de diversas formas (figura 16), muchos de los cuales se discurren sobre caidas y rocas en cascadas (foto 22). Estas cascadas se usan intensivamente para propósitos recreativos, sobre todo a la orilla de las carreteras. Los manantiales se han clasificado con respecto a su origen, litología, descarga, temperatura, y variabilidad: tipos volcánicos, de diaclasa, depresión, contacto, artesiano, tubular o de fractura (Guzmán Ríos 1983). En Puerto Rico hay ejemplares de la mayoría de estos tipos. Rodríguez Martínez (1997) clasificó 67 manantiales en 2 grupos en función de su reacción a la precipitación: manantiales de tipo difuso, con poca o ninguna reacción a la precipitación y manantiales de tipo conductivo, que presentan una reacción fuerte a la precipitación. Los manantiales Ojo de Agua en Vega Baja, Mameyes en Manatí y Mackovic en Vega Alta son manantiales difusos. Los manantiales Maguayo en Dorado, Ojo de Guillo en Manatí y San Pedro en Arecibo son del tipo conductivo.

En la franja kárstica no hay manantiales conocidos de primer o segundo orden, es decir, los que tienen caudales de base mayores de 2.8320 y 0.2832 m^3/s respectivamente. Sin embargo, se han medido descargas tan altas como de 1.7295 m^3/s luego de eventos de precipitación (Rodríguez Martínez 1997). Rodríguez Martínez (1997) encontró 10 manantiales de tercer orden (caudal de base de 0.028 a 0.2832 m^3/s), 4 de cuarto orden (0.0062 a 0.0282 m^3/s), 14 de quinto orden (0.0006 a 0.0062 m^3/s), 19 de sexto orden (0.00005 a 0.0006 m^3/s), 6 de séptimo orden (0.00001 a 0.00005 m^3/s) y 14 de octavo orden (caudal de base de unas pocas gotas por segundo). Algunos de los manantiales de octavo orden podrían estar secos y presentarse solamente después de un evento de precipitación; de otra manera quedan como charcas estancadas casi circulares.

La mayoría de los manantiales principales de Puerto Rico están en la región caliza y se asocian con las unidades carbonatadas de la secuencia del Terciario medio de la franja kárstica, salvo por las Formaciones Camuy y San Sebastián (Rodríguez Martínez 1997). Los manantiales drenan las partes no confinadas tanto del acuífero superior como del inferior. Los manantiales de la parte no confinada del acuífero inferior suelen nacer de las áreas de afloramiento de la Caliza Lares y del Miembro Calizo Montebello de la Formación Cibao. Los que drenan de la parte no confinada del acuífero superior nacen tanto de los afloramientos como de las áreas costeras subterráneas de las Calizas Aguada y Aymamón. No se sabe de ningún manantial que nazca de la parte confinada del acuífero inferior (Rodríguez Martínez 1997).

Al parecer, el factor controlador principal de la ocurrencia de los manantiales en la franja kárstica es el contraste de permeabilidad entre unidades geológicas del karso. El agua subterránea que fluye en los afloramientos de los acuíferos superiores e inferiores parece estar muy controlada por las fracturas y por consiguiente, la mayor parte de los manantiales en estas zonas parecen ser del tipo conductivo. El flujo de agua subterránea por las áreas

Foto 21. El acuífero de la costa norte descarga por los humedales costeros, como en esta laguna de Toa Baja en la carretera estatal 165. Foto de L. Miranda Castro.

Foto 22. Cascada formada por el manantial de Sonadora, Ciales, Puerto Rico. Foto de L. Miranda Castro.

centrales de los valles y las áreas más costeras del acuífero superior parece ocurrir en zonas permeables discontinuas tanto en el plano vertical como el plano lateral que pudieran estar conectadas por fracturas, y como resultado los manantiales que brotan son principalmente del tipo difuso (Rodríguez Martínez 1997). La figura 24 ilustra la complejidad del sistema de drenaje subterráneo que alimenta los manantiales.

Miles de manantiales en la zona caliza del Norte descargan cerca de la costa. En la región oeste de la zona caliza del Norte, desde el río Camuy hasta Aguadilla, se han registrado tres manantiales en el mar cerca de la costa y unos cuantos que descargan en la costa (Tucci y Martínez 1995). Se calcula la descarga al mar entre 0.11 a 1.02 m^3/s, una cifra mayor al consumo por bombeo (0.08 m^3/s) y que se aproxima al volumen de percolación a los arroyos (1.22 a 1.76 m^3/s). La descarga total de algunos de los manantiales principales de la franja kárstica puede ser tan alta como de 0.08 Mm^3/d, es decir 20 mgd (Rodríguez Martínez 1997).

Los manantiales que descargan en los ríos brotan de los riscos - a veces como cascadas - o surgen de los depósitos aluviales, y la mayoría descargan en las laderas al oeste de los ríos, lo cual sugiere que el patrón se debe a la inclinación hacia el este de las formaciones (Giusti y Bennett 1976). Sin embargo, se conocen algunos manantiales que descargan en la ribera este de los ríos, lo cual indica que la inclinación hacia el este no es el único factor determinante en la orientación de la descarga de los manantiales en la costa del norte (Rodríguez Martínez 1997). Esto se explica por la orientación de los conductos kársticos a medida que traspasan los varios niveles de saturación hidrológica en los estratos geológicos. Los manantiales en la planicie aluvial del río Grande de Arecibo suplementan la descarga de agua del río. Uno de ellos, el manantial de San Pedro, aporta 32,551 m3/d, es decir, 8.6 mgd (Quiñones Aponte 1986).

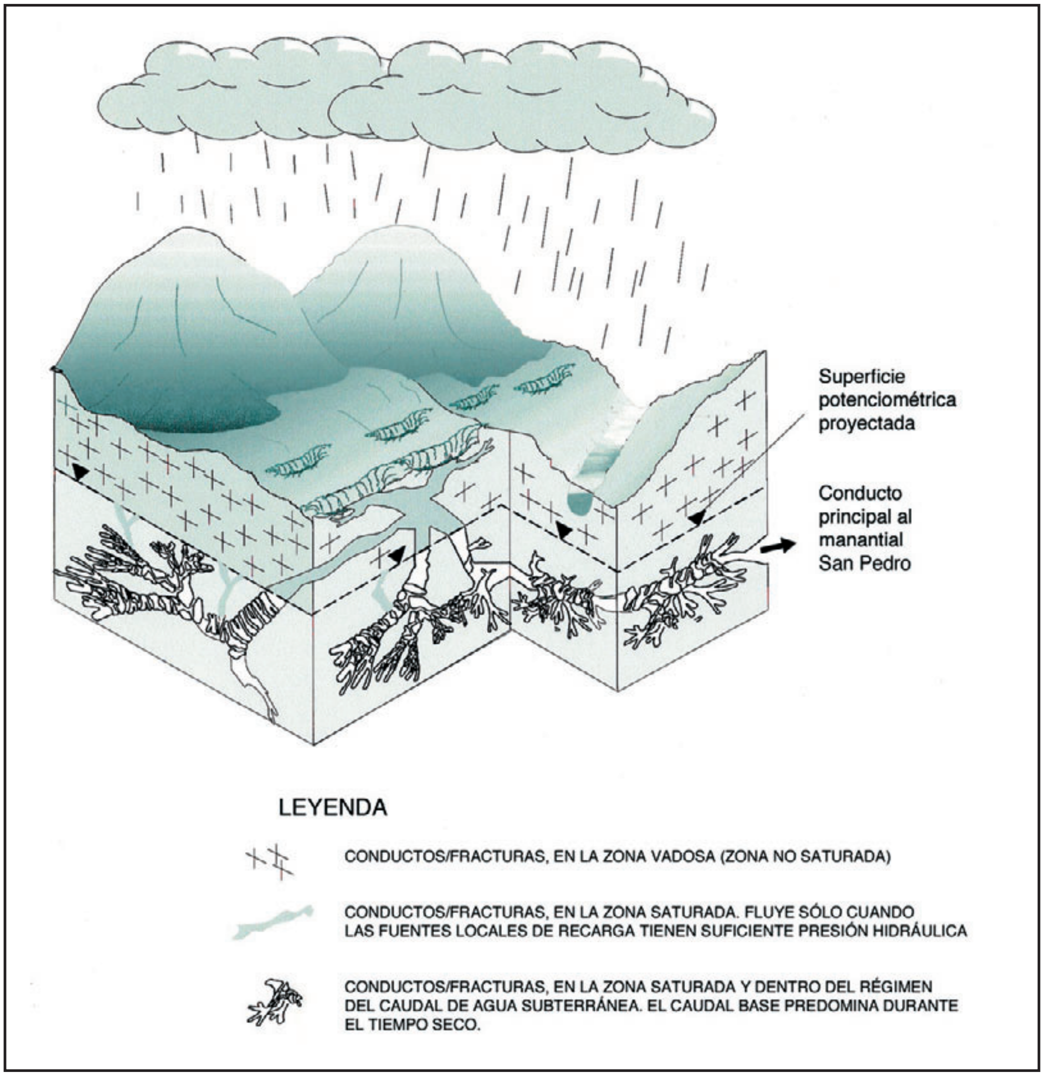

Figura 24. Diagrama esquemático que ilustra la complejidad de la red de conductos del manantial San Pedro (Rodríguez Martínez 1997). Este sistema de cavidades queda en la cuenca del río Grande de Arecibo.

Los parámetros de la calidad del agua de manantial tienden a reflejar los valores observados en las aguas subterráneas. Rodríguez Martínez (1997) encontró diferencias entre la calidad de agua entre los manantiales conductivos y difusos. Estas diferencias estaban relacionadas con el comportamiento hidrológico de los manantiales. Los manantiales conductivos se comportan como arroyos superficiales en reacción a los eventos de precipitación. Como resultado de esto, su calidad del agua también exibe variaciones a corto plazo. La descarga de los manantiales difusos cambia muy poco después de los eventos de precipitación y la calidad de agua de éstos reflejaba la de los acuíferos que drenaban. La temperatura del agua varía entre 22.5º a 28.0ºC. La conductividad específica varía entre 289 a 4,000 microsiemens por cm, aumentando a medida que se acerca a la costa, y el pH variaba entre 6.9 a 7.8. El calcio, el sodio, el bicarbonato y el cloruro son las especies iónicas

principales en las aguas de manantial. El tipo principal de agua es el agua de bicarbonato de calcio y los tipos secundarios de agua son las aguas de cloruro de bicarbonato de calcio y cloruro de bicarbonato de sodio. A excepción del manantial Ojo de Guillo, la calidad de agua medida en función de conteos bacterianos no ha variado en la franja kárstica desde 1983. En el sector Luis Pérez de Arecibo, los contajes de bacteria han alcanzado valores tan altos como 35,000 y 27,000 colonias de coliformes fecales y estreptococo fecal, respectivamente, por 100 mL (Rodríguez Martínez 1997).

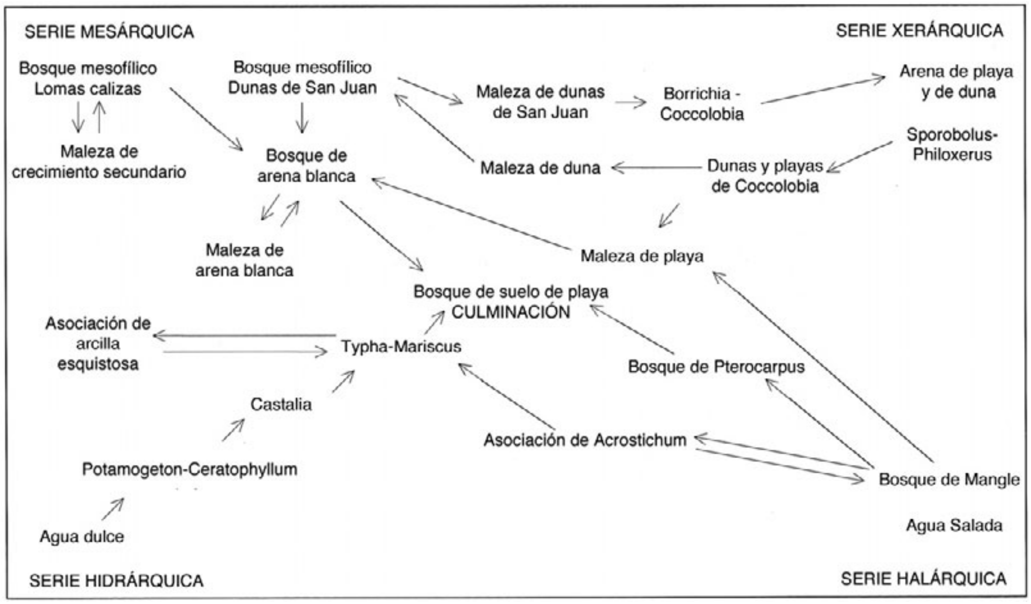

Figura 25. Las principales asociaciones de plantas de los valles costeros del Norte de Puerto Rico y las conjeturas sobre sus relaciones sucesionales (Gleason y Cook 1926). El diagrama está organizado con cuatro líneas de sucesión que convergen en el sistema de culminación "Bosque de suelo de playa" en el centro. Las sucesiones que se originan en agua dulce son hidrárquicas, en agua salada son halárquicas, en bosques húmedos son mesárquicas y en playas y dunas son xerárquicas.

Diversidad Ecológica

La variedad de formaciones terrestres y condiciones hidrológicas de la región del karso influyen en la variedad de sistemas ecológicos que allí se encuentran. Además, existen dieciocho (18) zonas geoclimáticas representadas en la zona del karso (figura 4, tabla 2), las cuales son responsables de la diversidad de sus ecosistemas. Los diferentes tipos de ecosistemas van desde los marinos y estuarinos a los terrestres y de agua dulce. Una zona costera de alto nivel energético con playas rocosas y arenosas, farallones, cavidades marinas, dunas de arena y aguas costaneras marinas representan el ambiente marino costero. El ambiente estuarino está representado por estuarios ribereños, manglares de cuenca y de baja salinidad protegidos detrás de las dunas de arena y el humedal herbáceo de mayor tamaño en la Isla, el caño Tiburones. Los sistemas de agua dulce incluyen la laguna Tortuguero, localizada a pocos metros del océano; manantiales, algunos de los cuales descargan al mar; charcas (foto 23); lagos artificiales y pequeños humedales, algunos con magníficas palmas reales, que aparecen en la base de los mogotes y a lo largo de intrusiones superficiales del acuífero. La vegetación diversa que crece en las blancas arenas de la costa, los bosques kársticos con una de las diversidades más ricas de árboles en la Isla y los sistemas ecológicos asociados a las cavidades y los sumideros componen el ecosistema terrestre.

Foto 23. Charca Las Tiguas, humedal cerca de Arecibo, Puerto Rico. Foto de L. Miranda Castro.

Vegetación Terrestre

Gleason y Cook (1926) desarrollaron un esquema de sucesión para la vegetación de la costa norte de Puerto Rico (figura 25). Aún cuando no se ha podido demostrar que estas interacciones sucesionales ocurren, este marco conceptual ofrece una perspectiva de utilidad general con respecto a los principales tipos de vegetación de esta región. En este trabajo prestamos mayor atención a los bosques de las lomas, pero al final de esta sección se ofrece un breve resumen de los otros tipos de vegetación identificados por Gleason y Cook (1926).

Los bosques kársticos en Puerto Rico, independientemente de las condiciones de lluvia prevalecientes, comparten características comunes incluyendo su **fisonomía** y las características de sus hojas. Los bosques de karso se caracterizan por árboles de poco diámetro, alta densidad de árboles y hojas escleromorfas. Los rodales tienden a evidenciar

condiciones de sequías frecuentes. Aún en la zonas húmedas y muy húmedas de la franja kárstica, los bosques tienen una gran proporción de especies de árboles deciduos y muestran un alto grado de escleromorfismo (Chinea 1980). Esto probablemente se debe a la rapidez de la escorrentía y a la percolación del agua de lluvia, así como al bajo nivel de almacenamiento de agua en suelos poco profundos, junto con los efectos de la abundante luz solar y los vientos en la vegetación. En la zona seca kárstica del Sur, las tendencias son aún más marcadas debido a una menor precipitación que varía más según la estación.

Los bosques kársticos comparten muchas características con otros bosques de la isla. Todos tienen doseles parejos con pocos árboles emergentes. Esta es una respuesta adaptativa a los vientos fuertes y las tormentas periódicas que eliminan las copas y los ganchos emergentes que pueden desarrollarse entre eventos de este tipo. Todos los bosques isleños comparten una marcada **dominancia de especies** (figura 26). Usualmente un máximo de cinco especies dominan los rodales al representar cerca del 50 por ciento de la densidad de los árboles y del área basal total del rodal, valores que al combinarse representan el **valor de importancia** de las especies. El resultado es que unas pocas especies dominantes y un gran número de especies raras caracterizan los rodales. Lugo (1991) atribuyó esta alta dominancia a perturbaciones infrecuentes de gran escala como son los

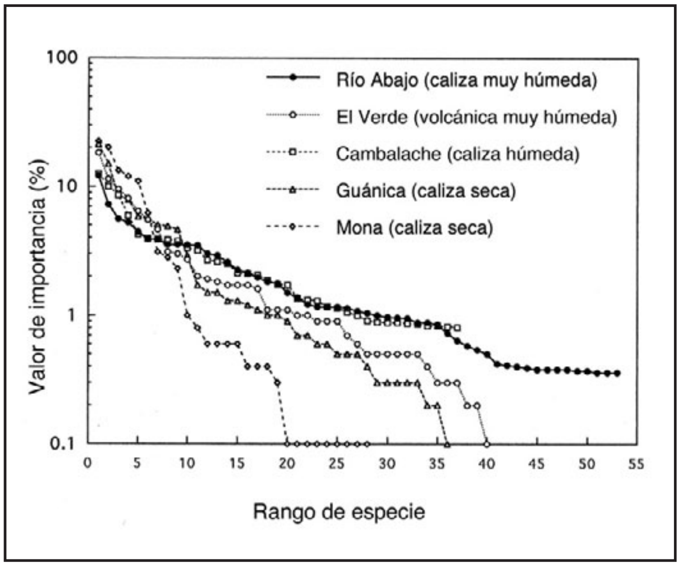

Figura 26. Curvas de valores de importancia de los rodales de bosque en las zonas geoclimáticas de Puerto Rico, volcánicas muy húmedas (El Verde), kársticas húmedas y muy húmedas (río Abajo, Cambalache) y kárstica seca (Guánica, Mona). Los datos se pueden obtener de A.E. Lugo.

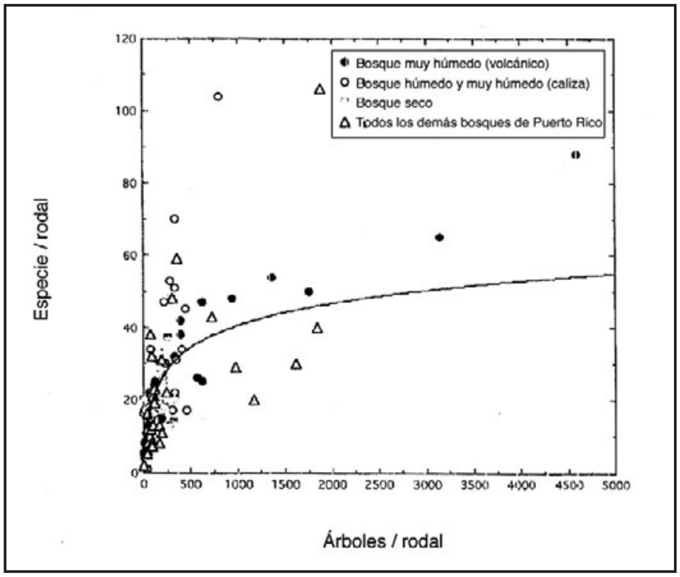

Figura 27. Representación gráfica del número de especies de árboles por rodal y la densidad de árboles por rodal. Los bosques secos son de la caliza del sur, mientras que los bosques húmedos y muy húmedos son de la caliza del norte. Los bosques muy húmedos volcánicos son de la Sierra de Luquillo. La relación entre la cantidad de especies de árboles en un rodal (y) y la densidad de los árboles (x) y la cantidad de especies de árboles por miles de individuos (y') se describe con regresiones o se obtiene de éstas. Para los bosques muy húmedos en roca volcánica—y = -43.78 + 30.89*LOG(x) donde r^2= 0.84, n = 19 e y' = 49. Para los bosques húmedos y muy húmedos en el karso—y = -13.79 + 20.01*LOG(x) donde r^2= 0.37, n= 39 e y' = 46. Para los bosques secos en el karso—y = -30.27 + 24.95*LOG(x) donde r^2= 0.52, n = 26, e y' = 45. Para otros bosques en Puerto Rico—y = -20.75 + 20.46*LOG(x) donde r^2= 0.46, n = 40, e y' = 41. Para todos los bosques en conjunto—y = -21.85 + 22.16*LOG(x) donde r^2= 0.50, n = 124 e y' = 44. La línea de regresión es para todos los bosques. Las líneas de regresión para los tipos individuales de bosque tienen una pendiente levemente más marcada. Los datos se pueden obtener de A.E. Lugo.

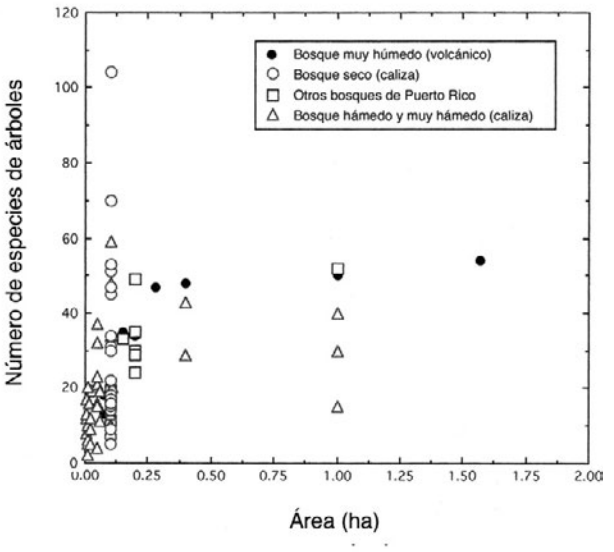

Figura 28. Curva de especies-área para los bosques de Puerto Rico (Lugo, en prensa).

huracanes.

El número de especies por número de tallos (figura 27) y el número de especies por unidad de área (figura 28) también son relativamente uniformes en todos los bosques en Puerto Rico. En todos los rodales estudiados se encontraron aproximadamente 44 especies de árboles por cada 1,000 individuos. La relación entre la riqueza de especies y la densidad de tallos es relativamente débil (r^2=0.37) debido a la gran variabilidad de riqueza de especies en los bosques kársticos. Sin embargo, el contaje mayor de especies de árboles por 0.1 ha se encontró en un bosque kárstico del norte, mientras que los bosques kársticos del sur exhibían el mismo patrón y curva de especies por área que los bosques húmedos de origen geológico volcaniclástico (figura 28).

Los bosques kársticos también se caracterizan por una distribución de grupos de árboles, que se debe a la naturaleza del terreno en el cual se desarrollan. Los árboles crecen mejor en suelos profundos, pero éstos son escasos en el karso y además los afloramientos rocosos limitan los lugares donde pueden establecerse los árboles. De hecho, semillas de especies, como *Plumeria alba*[6] en la zona kárstica del sur, pueden germinar sobre superficies rocosas; lo cual sugiere una adaptación extrema a substratos rocosos de poca profundidad (foto 24). El crecimiento de los árboles en las grietas y en suelos profundos les brinda una ventaja para protegerse de los fuertes vientos y de los huracanes. Los árboles bien arraigados pueden soportar vientos muy fuertes, perdiendo sólo las hojas y algunos ganchos. En los bosques del karso se encuentran pocos árboles totalmente desarraigados luego del paso de un huracán, con excepción de aquellos que se habían establecido encima de rocas o suelos de poca profundidad. Debido a las limitaciones impuestas por los suelos, los árboles en los bosques kársticos por lo general son más bajos que los de bosques de origen volcánico con igual cantidad de lluvia pero con suelos más profundos.

La característica más importante de los bosques del karso es quizás la más difícil de detectar. Los bosques del karso exhiben numerosos gradientes en estructura vegetal, fisonomía y composición como resultado de la variedad de gradientes ambientales y topográficos en la región. Chinea (1980) describió un gradiente de lluvia de este a oeste, producto de los efectos de los vientos alisios, en el cual la lluvia disminuía del este hacia el oeste, y otro gradiente de norte a sur, producto de la topografía, en el cual la lluvia aumentaba de norte a sur según la elevación. La exposición al viento también establece dos gradientes dentro de los mogotes: una mayor exposición al viento en las laderas del noreste y menor en las del suroeste y vientos más fuertes en las cimas que en las faldas de los mogotes. Las características de los suelos resultan en suelos profundos y fértiles en los valles y en suelos de poca profundidad, rocosos e infértiles en las cimas de los mogotes. Las laderas exhiben características edáficas intermedias.

La reacción vegetativa a estos gradientes ambientales es compleja en parte porque se requiere tomar en cuenta los efectos de usos históricos del terrenos, edad, elevación y tamaño de los rodales forestales (Rivera y Aide 1998). Sin embargo, Chinea (1980) llevó a cabo estudios de ordenación a nivel de un solo mogote así como con varios mogotes, a la vez que controlaba algunas de estas variables. Encontró que el área basal de especies individuales variaba a lo largo de una distribución normal cuando se ordenaban los gradientes de categorías **xéricas** a **mésicas**. Sus hallazgos indicaron que algunas especies tuvieron su mayor índice de área basal en condiciones xéricas a la

Foto 24. Árboles como este almácigo (*Bursera simaruba*) pueden crecer en las fisuras y desarrollar sistemas de raíces fuertes que les permiten sobrevivir los huracanes y las sequías. Obsérvese cómo las raíces penetran en las fisuras. Foto de L. Miranda Castro.

[6] Conservamos el nombre científico usado en las fuentes originales reseñadas.

vez que otras en condiciones mésicas, y además, que a cualquier nivel de humedad se podían encontrar especies que lograban su área basal óptima. Chinea encontró que, tanto en los mogotes solos como en las agrupaciones múltiples, a medida que las condiciones se tornaban mésicas, se evidenciaba una reducción lineal en las especies de hojas esclerófilas. Los valores variaron desde más de 60 por ciento de especies con hojas **esclerófilas** en condiciones xéricas, hasta casi cero por ciento bajo condiciones mésicas. En contraste, la altura de los árboles aumentó a lo largo del mismo gradiente desde menos de 10 m hasta más de 25 m.

Los estudios de los bosques de la franja kárstica se han concentrado en los mogotes, donde los rodales se han clasificado utilizando numerosos criterios. Por ejemplo, Álvarez Ruiz y otros (1997) usaron edad, fisonomía y usos de terrenos para clasificar los rodales; Beard (1949, 1955) usó sólo fisonomía y Dugger y otros (1979) usaron las posiciones topográficas, valles, pendientes y cimas. Los bosques de la franja kárstica son muy diversos en cuanto a la composición de especies y fisonomía. Utilizando técnicas de ordenación, Chinea (1980) identificó tres tipos de bosques en la franja kárstica: el bosque mésico, arboleda seca y arboleda mixta (figura 29). Chinea también identificó como bosques de riscos a un tipo vegetativo topográfico compuesto por la vegetación en los bordes de los riscos.

Foto 25. Bosque mesofítico en la base de un mogote, Ciales, Puerto Rico. Foto de J. Colón.

Foto 26. Bosque seco en las pendientes de los mogotes, Arecibo, Puerto Rico. Foto de J. Colón.

Los bosques mésicos se encuentran en la base de los mogotes (foto 25). Estos tienen un dosel cerrado de 25 a 30 m de altura, especies siempreverdes de hojas **mesófilas**, una segunda capa de árboles de grandes hojas entre 15 a 20 m de altura y una capa de arbustos entre 5 a 10 m de altura y un suelo cubierto de herbáceas y plántulas. Especies muy comunes en este tipo de bosque son *Dendropanax arboreus* (palo de pollo) y *Quararibea turbinata* (garrocho).

La arboleda seca se encuentra en las pendientes y cimas expuestas (fotos 26 y 27). El dosel de este bosque es deciduo y los árboles alcanzan alturas de 16 a 18 m. Las hojas son esclerófilas y varían en tamaño desde **micrófilas** a mesófilas. El sotobosque contiene arbustos y pequeños árboles con hojas siempreverdes. Los tamaños de las hojas fluctúan desde **nanófilas** a **macrófilas** y la mayoría son esclerófilas. Algunas especies comunes son *Coccoloba diversifolia* (uvilla) y *Bursera simaruba* (almácigo). La arboleda mixta es una combinación de los dos tipos anteriores y se encuentra en lugares intermedios entre los protegidos y los expuestos. Puede encontrarse en la parte baja de las pendientes o en

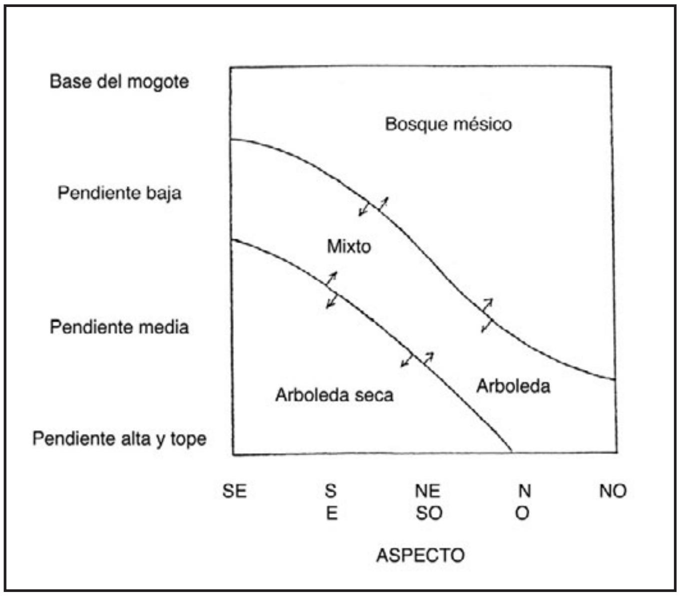

Figura 29. Ordenación de los principales tipos de bosques en los mogotes de la franja del karso (Chinea 1980).

Foto 27. Bosques secos en las cimas de los mogotes y bosques mesofíticos de dosel nivelado en la base de los mogotes en Ciales, Puerto Rico. Foto de L. Miranda Castro.

Tabla 8. Estructura de la vegetación en la costa húmeda de arenas blancas de Dorado, Puerto Rico (modificado de Figueroa y otros 1984). Los datos son de árboles con un diámetro a la altura del pecho de > 2.5 cm. El índice de complejidad se calculó para un área de 0.1 ha y es el producto de altura, área basal, densidad de árboles, número de especies y 10^{-3}.

Tipo de Bosque	***Especie (núm./0.1ha)***	***Densidad de árboles (núm./ha)***	***Área basal (m2/ha)***	***Altura (m)***	***Índice de Complejidad***
Secundario viejo	32	1880	41.6	19.7	493
Secundario joven	19	1833	29.0	19.3	194
Clusia-Zyzygium	11	3200	25.6	20.7	187
Pterocarpus	7	1680	44.6	19.0	100
Perturbado de dosel abierto	9	1000	21.8	17.0	33
Palmar abandonado	5	1600	32.6	12.3	32

las cimas, dependiendo del aspecto.

La arboleda de riscos se encuentra en los bordes de los precipicios donde ocurren cambios abruptos en la elevación. Los árboles estranguladores, intolerantes a la sombra y siempreverdes, dominan la vegetación en este bosque; las raíces especializadas de estos árboles les permiten obtener agua y nutrientes desde muy lejos. Las especies dominantes son del género *Clusia* e incluye *Clusia rosea* (cupey). Esta asociación resulta conspicua por sus sistemas de raíces colgantes en los lados de los riscos, visibles cuando se viaja a lo largo de las carreteras viejas que atraviesan los valles de los mogotes. Debido a que las carreteras y autopistas modernas suelen cortar por el medio de los mogotes este tipo de vegetación ya no es visible desde las mismas.

Los bosques de los llanos se talaron para fines agrícolas en la temprana colonización de Puerto Rico, por lo cual resulta difícil reconstruir su composición y estructura original. No obstante, se cree que los bosques de los ricos suelos aluviales de la costa norte eran de los más majestuosos de la Isla (foto 28). Un tipo de bosque que sobrevivió en los llanos fue el bosque sobre arenas blancas, descrito inicialmente por Gleason y Cook (1926). Un estudio realizado en 1980 de los rodales originalmente visitados por Gleason y Cook (Figueroa y otros 1984) ilustró la complejidad de la estructura y composición vegetativa - resultado de los usos históricos del terreno - y las variaciones en topografía y tipos de suelos. Figueroa y otros (1984) estudiaron un área de 39.5 ha e identificaron seis tipos de vegetación basándose en la fisonomía y la edad (tabla 8). De éstas, el rodal de bosque secundario más viejo resultó ser el más parecido en composición al bosque original de la región. Especies tales como *Manilkara bidentata* (ausubo), *Lonchocarpus latifolius* (retama) y *Pisonia subcordata* (corcho blanco) formaban rodales de hasta 19.7 m de altura con una riqueza de especies de 32 especies/0.1 ha. Se observaron dos especies en peligro de extinción en 1980: *Cassia mirabilis*, una especie herbácea endémica y *Ficus stahlii* (jagüey), un árbol.

Foto 28. Árbol gigante en los fértiles suelos profundos de Arecibo, Puerto Rico. Foto de J. Colón.

Lugo (inédito) encontró que los bosques del karso tienen una gran productividad primaria, árboles de rápido crecimiento y una rápida regeneración y sucesión luego de sufrir perturbaciones. Rivera (1998) estudió la sucesión en la franja kárstica y encontró que el uso histórico de los terrenos afectaba el patrón de regeneración y la dinámica de los rodales por largos años. Los bosques recuperados de pastizales abandonados tenían una mayor diversidad de especies leñosas en comparación con los de los cafetales abandonados. También tenían una mayor densidad de árboles pero un área basal similar (Rivera y Aide 1998). La composición y la dominancia de especies también era diferente entre los bosques que se recuperaban en pastizales y en cafetales abandonados. *Guarea guidonia* era la especie dominante en las plantaciones cafetaleras abandonadas y es la especie que se utiliza para proveer sombra al café. Una especie forastera, *Spathodea campanulata*, dominaba los bosques que se recuperaban en pastizales abandonados. La tasa de sucesión era rápida y similar en los rodales de ambos tipos de bosques y se aceleraba con la dispersión de semillas por los murciélagos.

A lo largo de la costa norte de Puerto Rico (foto 29) se da una compleja vegetación costera, tanto en las dunas como en la playa. Esta vegetación es controlada por las duras condiciones ambientales de la zona costera que incluyen suelos arenosos, bajos niveles de humedad en el suelo, el efecto constante del salitre y una alta frecuencia de vientos de gran velocidad. Como resultado, la vegetación es

Foto 29. Vegetación de las dunas costeras. Estas dunas muestran el impacto humano. Foto de J. Colón.

generalmente escleromórfica, de baja estatura y muestra los efectos del viento. En la playa arenosa más expuesta, la vegetación está postrada, como por ejemplo *Philoxerus vermicularis,* o tiene las raíces en la parte alta de la playa y se arrastran hacia el mar, tal como lo hacen *Ipomea pescaprae* y *Sporolobus virginicus*. Éstas dan paso a plantas que forman dunas tales como *Chamaesyce buxifolia, Diodia maritima* y otras. Detrás de las plantas que forman dunas se encuentran los matorrales playeros, dominados por *Coccoloba uvifera*, especie que puede llegar a crecer tan alta como un árbol cuando se encuentra en las laderas de sotavento de dunas estables. A medida que la presencia de la vegetación o la protección de la duna reduce los impactos del viento, el tamaño de las plantas aumenta y eventualmente forma un bosque de dosel cerrado detrás de las dunas.

Humedales

Los humedales de agua dulce de la franja kárstica incluyen pantanos en la base de los mogotes, humedales forestados en la zona fluvial que incluyen ebulliciones de manantiales y valles aluviales, así como humedales forestados o sin forestar en los valles entre los mogotes. El factor que determina el tipo de humedal es el **hidroperiodo.** Un hidroperiodo más largo favorece a los pantanos y uno más corto favorece a los humedales forestados. Los helechos y las plantas emergentes macrófitas tales como la *Typha* son las especies dominantes en los humedales no forestados. Las especies *Pterocarpus officinalis* (palo de pollo), *Roystonea borinquena* (palma real), *Calophyllum brasiliense* (maría), *Bucida buceras* (úcar) y *Prestoea montana* (palma de sierra) predominan en los humedales forestados. La orquídea epifita endémica *Epidendrum kraenzlinii* se encuentra en el bosque de *Pterocarpus* así como el arbusto en peligro de extinción, *Sabicea cinerea*.

En los valles de la altura y en la base de los mogotes, los manantiales y los rezumaderos dictan el hidroperiodo. En la zona costera, las grandes descargas del acuífero crean los humedales, como es el caso del caño Tiburones y los humedales que cercan la laguna Tortuguero. En estos humedales costeros, el hidroperiodo es generalmente más largo que en los valles de los mogotes; por lo cual están dominados por ciénagas - las extensiones mayores de estos ecosistemas en Puerto Rico. Gleason y Cook (1926) enumeraron las plantas acuáticas macrófitas comunes en estos humedales y que incluyen: *Typha angustifolia, Mariscus jamaicensis, Phragmites phragmites* y muchas otras plantas acuáticas emergentes, flotantes y sumergidas. Debido a la abundancia de manantiales y rezumaderos, el mapa de los humedales en la zona kárstica del Norte muestra cientos de humedales pequeños diseminados entre los mogotes y otras formaciones escarpadas, así como las áreas grandes de humedales en la zona costera y los valles aluviales de los ríos principales (figura 23).

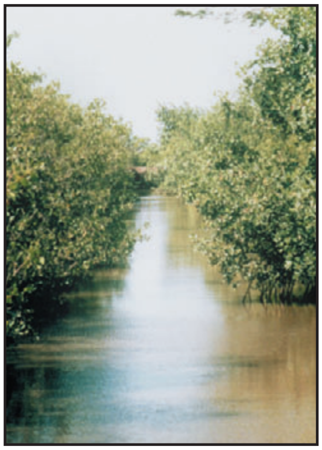

Foto 30. Manglar en Toa Baja, Puerto Rico. Foto de L. Miranda Castro.

Estuarios

Los estuarios se forman donde el agua de mar se mezcla con las escorrentías terrestres de agua dulce. Los manglares dominados por mangle rojo, *Rhizophora mangle*, siguen las intrusiones salinas que penetran río arriba por debajo de la descarga de agua dulce (foto 30). Estos bosques se encuentran en la zona fluvial que se extiende varios kilómetros tierra adentro, usualmente tan lejos como la cuña de intrusión salina penetra río arriba bajo la capa de agua dulce (Lugo y Cintrón 1975). Estos manglares, denominados fluviales o ribereños, son de los más productivos de la Isla. Además del mangle rojo, R. mangle, estos bosques contienen otras especies, en particular, el mangle blanco, *Laguncularia racemosa* y el mangle negro, *Avicennia germinans*. Los ríos aportan abundante agua fresca y nutrientes, factores que contribuyen a la alta productividad de estos ecosistemas.

El Océano Atlántico tiene un oleaje fuerte, de alto nivel energético, y por lo tanto los manglares ribereños no crecen a lo largo de esta costa, mientras que sí lo hacen a lo largo de la costa sur, de bajo nivel energético. Es decir, en la costa norte no crecen manglares ribereños a lo largo de las playas ni se producen islotes de manglares, como ocurre en las costas del Sur. Los manglares en la costa norte crecen en la zona estuaria detrás de las dunas de arena y se conocen como manglares de cuenca. A diferencia de los manglares de cuenca de las costas áridas del sur de la Isla, los de la costa norte tienen baja salinidad y debido a ello desarrollan una biomasa significativa y una estructura arbórea de gran altura.

En Puerto Rico, los manglares detrás de las dunas de arena se encuentran solamente en la costa norte. Las cuatro especies de mangles, *R. mangle, A. germinans, L. racemosa* y *Conocarpus erecta* (mangle botón) se encuentran en los manglares de cuenca o cerca de éstos. Detrás de los bosques, el ecosistema varía desde estuarino al de agua dulce a medida que se extiende tierra adentro. En esta zona de transición, se pueden encontrar matorrales del helecho de mangle, *Acrostichum aureum* y especies arbóreas tales como *Annona glabra* (corazón cimarrón) y *P. officinalis*. Detrás de los manglares se desarrollan humedales forestados o sin forestar que pueden o no estar sujetos a los efectos de mareas y que surgen como respuesta al hidroperiodo.

La Franja Kárstica Contiene Recursos Naturales Muy Valiosos

Flora y Fauna Fósil

La franja kárstica ofrece una bonanza de oportunidades a los estudiosos de la paleontología de Puerto Rico y el Caribe. En el área se han producido hallazgos significativos desde la década de 1920 cuando B. Hubbard (1923) produjo una lista de plantas fósiles recolectadas del río Guajataca cerca de Lares. Charles Arthur Hollick confirmó y añadió datos a estos informes en sus publicaciones de 1924 y 1926. También resumió todos estos informes y añadió una lista de plantas microfósiles del Terciario de la región de Lares-San Sebastián, en su tomo sobre Paleobotánica de Puerto Rico del Inventario Científico de Puerto Rico y las Islas Vírgenes (Hollick 1928). Las 88 categorías o taxones de plantas enumeradas para esta zona del karso han sido reconocidas como la mayor lista de flora macrofósil producida para el Terciario entre todas las regiones del neotrópico (Graham 1996). Las investigaciones más recientes de la vegetación fósil de Puerto Rico se han centrado en el estudio de la paleopalinología, el estudio del polen fósil. Graham (1996), presentó una reseña detallada tanto de la macropaleoflora como de la micropaleoflora de la región. Estos datos resultan muy importantes porque proveen una perspectiva evolutiva de la flora original del karso, dada la gran destrucción sufrida por estos bosques desde la temprana colonización prehispánica (Domínguez Cristóbal 1989a, b) y la constante alteración humana posterior (Torres González y Wolansky 1984, Dopazo y Molina Rivera 1995).

La vida animal moderna de Puerto Rico es muy diferente a la que utilizaba las comunidades de plantas de la Isla hace miles de años. Nuestro conocimiento de esta fauna depende de los fósiles recuperados de las cavidades o de las rocas expuestas que abundan en la franja kárstica. Cuando los animales terrestres mueren en los bosques tropicales, sus huesos se destruyen rápidamente por acción de necrófagos y de la meteorización, sin dejar evidencia fósil de su existencia. En la franja kárstica se han hallado fósiles de animales marinos preservados, tales como los tiburones y los Dugongos. El extinto Tiburón de Grandes Dientes, *Carcharodon* (*Carcharocles*) *megalodon* (Nieves Rivera 1999) que se registró originalmente para el Mioceno en la zona neártica se encontró preservado en Isabela y otras zonas kársticas. Estos hallazgos destacan la importancia del karso de Puerto Rico para el entendimiento de la historia natural de estas especies. En tres lugares distintos del sistema de cavidades del río Encantado se han visto dibujos prehistóricos en las paredes y se han encontrado ejemplares del Dugongo *(Caribosirenia tumeri y Halitherium antillensis)*, un pariente extinto de los manatíes modernos. Las colecciones de estos fósiles se encuentran en el Instituto Smithsonian en Washington, D.C. y posiblemente ayudarán a completar la reconstrucción de una calavera completa de un Dugongo (Halton 1996).

Hay pocos fósiles de anfibios y reptiles. Pregill (1981) y Pregill y Olson (1981) discutieron la presencia e importancia de estos hallazgos de herpetofauna en el karso del Caribe y en particular los de Puerto Rico. La mayor parte de estos hallazgos están asociados con depósitos en las cavidades probablemente de residuos dejados por pájaros, mamíferos o fenómenos naturales. Se han encontrado en los depósitos kársticos evidencia de la especie endémica *Peltophryne lemur*, Sapo Concho de Puerto Rico (foto 31), y de serpientes ya extintas del género *Leiocephalus* (*L. etheridge y L. oartitus*) (Pregill 1981). Otros materiales fósiles aún sin describir se encuentran en el Museo Nacional de EE.UU. y en el Museo Americano (Storrs Olson, comunicación personal).
Los registros de muchos vertebrados terrestres ya extintos se conservaron en las cavidades, donde los huesos quedaban protegidos de los efectos destructivos del sol y la lluvia. Las cavidades actuaron como tumbas naturales, conservando los huesos por decenas o hasta cientos de miles de años. Estos restos animales llegan a las cavidades de distintas maneras. Por ejemplo, algunas cavidades tienen simas de gran profundidad, que sirven de trampas naturales y muy letales para los animales incautos; otras cavidades pueden servir de madrigueras y preservar sus ocupantes luego de su muerte. Los restos de un Perezoso Terrestre endémico del tamaño de un perro, (*Acratocnus odontrigonus*, Anthony 1916a) y de una Hutía Gigante (*Elasmodontomys obliquus*, Anthony 1916a), parecen señalar que probablamente utilizaban las cavidades de esta forma.

Otros restos de fósiles encontrados en las cavidades pueden ser residuos de alimentos llevados a las cavidades por los búhos; en algunas instancias, estos **bolos** (o depósitos) dejados por búhos podrían contener miles de pequeños huesos. Entre las aves endémicas ya extintas pero preservadas en

Foto 31. El Sapo Concho, endémico de Puerto Rico. Foto de J. Colón.

las cavidades de Puerto Rico se encuentran: una becasina (*Scolopax anthonyi*, Olson 1976), una paloma codorniz (*Geotrygon larva*, Wetmore 1920), un búho (*Tyto cavatica*, Wetmore 1920), un vencejo (*Tachornis uranoceles*, Olson 1982), una caracara (*Polyborus latebrosus*, Wetmore 1920), un cuervo (*Corvus pumilis*, Wetmore 1920) y un finche (*Pedinorhis stirpsarcana*, Olson y McKitrick 1981). Otros mamíferos endémicos pequeños también eran presa de los búhos habitantes de las cavidades (Anthony 1916b). El musgaño o musaraña isleño (*Nesophonthes edithae*, Anthony 1916a) es el único representante de Puerto Rico de la familia monogenérica Nesophontidae, que al presente se cree que incluye 11 especies (McFarlane 1999a,b). Los Roedores Puertorriqueños *Puertoricomys corozalus* (originalmente llamada *Proechimys corozalus*, Williams y Koopman 1951) y *Heteropsomys insulans* (que incluye a *Homopsomys antillensis* según descrita por Anthony 1917) también eran presa de los búhos antes de que arribaran las ratas de los barcos en el periodo histórico.

Por último, los huesos hallados en las cavidades pueden ser restos de comidas de los humanos. La primera evidencia de la extinta ave Zancuda incapaz de vuelo (*Nesotrochis debooyi*, Wetmore 1922) y de la Hutía (*Isolobodon portoricencis*, Allen 1916) de tamaño de un conejo - que a pesar de su nombre científico se cree que fue traída a Puerto Rico por los indios desde La Española - de donde es nativa, fueron recuperados de concheros indígenas en cavidades.

Los registros de la fauna ya extinta de Puerto Rico que se conservan en la franja kárstica, particularmente en las cavidades están en serio peligro de perderse para siempre. La alteración de estas cavidades para la extracción del **guano**, la construcción de carreteras y la transformación en atracciones turísticas han destruido registros fósiles únicos antes de que pudieran ser examinados, protegidos o documentados. Los recursos en las cavidades visitadas sin control y en exceso fueron destruídos: los suelos fueron apisonados y erosionados, los restos a plena vista han sido saqueados y el potencial para recobrar algunos de estos datos se redujo considerablemente. Solo un pequeño por ciento de las cavidades puertorriqueñas contienen fósiles en su condición natural, aún sin tocar por los humanos y, por ende, útiles para la ciencia. Nuestra habilidad para documentar el pasado isleño dependerá de los esfuerzos por proteger estos depósitos para estudio científico en el futuro.

Flora

La flora de la franja kárstica representa una transición entre los bosques muy húmedos de substrato volcánico y los bosques secos de substrato calizo. Chinea (1980) encontró que 80 especies del bosque muy húmedo de tabonuco de la Sierra de Luquillo y 27 especies de árboles de los bosques secos calizos también crecían en la franja kárstica. La franja kárstica contiene tres especies de árboles que representan substratos rocosos diferentes: volcánicos y kársticos; diferentes zonas de vida: húmedas, muy húmedas y secas; y condiciones fisiográficas diferentes: costeras y montanas.

Cerca del 25 por ciento de las especies de árboles en la franja kárstica son deciduas. Muchas otras especies son deciduas facultativas y pierden sus hojas en las sequías extremas. Las familias más comunes son: Leguminosae, Myrtaceae, Rubiaceae, Lauraceae y Euphorbiaceae. Las especies de árboles típicos de esta zona son: *Aiphanes acanthophylla* (palma de coyor), *Gaussia attenuata* (palma de lluvia), *Coccoloba diversifolia* (uvilla), *Coccoloba pubescens* (moralón), *Licaria salicifolia* (canelilla), *Zanthoxylum martinicense* (espino rubial), *Bursera simaruba* (almácigo), *Cedrela odorata* (cedro hembra), *Hyeronima clusioides* (cedro macho), *Sapium laurocerasus* (tabaiba), *Thouinia striata* (ceboruquillo), *Thespesia grandiflora* (maga), *Ochroma pyramidale* (balsa), *Clusia rosea* (cupey), *Bucida buceras* (úcar, foto 32), *Tetrazygia eleagnoides* (verdiseco), *Sideroxylon salicifolia* (sanguinaria), *Sideroxylon foetidissimum* (tortugo amarillo), *Guettarda scabra*

Foto 32. Úcar (*Bucida buceras*). Foto de L. Miranda Castro.

Foto 33. Roble (*Tabebuia* sp.) Foto de J. Colón.

Foto 34. Palma real puertorriqueña (*Roystonea borincana*), especie endémica. Foto de L. Miranda Castro.

(palo cucubano), *Terebraria resinosa* (aquilón) y *Randia aculeata* (tintillo) (Little y otros 1974).

La riqueza de especies de la flora de la franja kárstica está representada en el Bosque Estatal de Río Abajo, que contiene especies de los climas húmedos y muy húmedos (foto 33) de la región. Inicialmente Little y Wadsworth (1964) y Little y otros (1974) documentaron la presencia de 175 especies de árboles que representaban 53 familias en las 3,000 ha del Bosque Estatal de Río Abajo. Sin embargo, Álvarez Ruiz y otros (1997) documentaron 242 especies de árboles representando 51 familias en el mismo bosque, de las cuales sólo 27 especies eran deciduas. Del total de especies de árboles, 36 eran forasteras, 35 eran endémicas y 43 eran raras. Woodbury reportó 41 especies de árboles endémicos (foto 34) y 43 especies de árboles raros en el Bosque Estatal de Río Abajo (Álvarez y otros 1983). Acevedo Rodríguez y Axelrod (1999) publicaron una lista anotada para el Bosque Estatal de Río Abajo que contenía 1,030 especies de plantas vasculares: 878 nativas, 158 forasteras y 88 endémicas. Figueroa Colón (1995) estimó que en la franja kárstica muy húmeda y húmeda se encontraban el 23% y el 16%, respectivamente, del total de especies de árboles endémicos de Puerto Rico.

Fauna

Diversos filos de animales invertebrados forman la mayor parte de la fauna de cualquier zona. Nos concentraremos en los vertebrados, con algunos comentarios breves sobre la macrofauna acuática y los invertebrados de las cavidades. No existe un estudio exhaustivo de los invertebrados de la región caliza, pero recomendamos consultar a Vélez (1979a,b,c) para una reseña general sobre los invertebrados isleños. Para información sobre grupos de animales en particular, recomendamos los siguientes estudios: arañas - Petrunkevitch (1929, 1930a, b); insectos - Martorell (1945) y Wolcott (1948); moluscos terrestres - Van der Schalie (1948); moluscos acuáticos - Aguayo (1966); decápodos - Vélez (1967a); milpiés - Vélez (1967b); ciempiés - Santiago de Rohena (1974); escorpiones - Santiago Blay (1984); y las lombrices de tierra - Borges y Moreno (1990, 1992).

Macrofauna Acuática

La mayor parte de la macrofauna nativa de agua dulce de Puerto Rico se encuentra en la franja kárstica, a pesar de la baja densidad de drenaje subaéreo. Si la comparamos con los continentes, la isla tiene un número pequeño de especies de animales de agua dulce. La barrera oceánica que evita la dispersión de las especies de agua dulce limita marcadamente el número de especies presentes en los ecosistemas de agua dulce (Covich y McDowell 1996). La mayor parte de las especies de agua dulce necesita migrar entre ecosistemas de agua dulce y salada para completar su ciclo de vida.

Conocemos sobre cien especies de peces **anádromos** y **catádromos** que residen en Puerto Rico (Erdman 1972, 1984; Grana Raffucci 1993). Las desembocaduras de los ríos, los estuarios y los manglares son muy importantes para la supervivencia de los peces. Aunque incompletas, las tablas 9 y 10 enumeran 99 especies de peces en 33 familias. La mayor parte de las especies son marinas y/o de valor comercial y 25 son especies introducidas a ecosistemas de agua dulce, todas de valor comercial o deportivo (tabla 10). Las familias más grandes de peces silvestres que se encuentran en la franja kárstica son la familia Gobiidae (ocho especies), la Gerreidae y la Haemulidae (seis especies cada una). Las familias con el mayor número de especies introducidas son Centrarchiidae, Cichlidae y Poecillidae (con seis especies cada una).

Las especies nativas de peces incluyen el mugil de montaña, conocido localmente como Dajao, la Anguila, la Saga, la Guabina y el Chupapiedra (tabla 9). Estos suelen pescarse con fines deportivos o de consumo humano. El Dajao es una especie de agua dulce popular para la pesca, que puede crecer hasta 30 cm y pesar hasta 250 g (Erdman 1967). Esta especie entra a los ríos cuando tiene aproximadamente 2.5 cm de largo y se desarrolla ahí hasta su adultez. El Dajao casi ha desaparecido de muchos sistemas fluviales debido a la construcción de represas altas que impiden que la especie llegue a las cabeceras de los ríos (Erdman 1967).

Enumeramos también 24 especies de crustáceos pertenecientes a 8 familias. Entre éstos, los camarones de agua dulce son mucho más abundantes que los peces en muchos ríos (Erdman 1967). Hay por lo menos cinco especies que se pescan con regularidad para fines deportivos o comerciales. Uno de éstos, *Macrobrachium carcinus*, se ha informado que puede llegar a pesar hasta 0.5 Kg. y medir hasta 45 cm de largo (Erdman 1967, B. Yoshioka, comunicación personal, 2000). Algunos de los ejemplares más grandes de esta especie han sido pescados en el río Grande de Arecibo y en el río Grande de Manatí. Se conoce que ésta y otras especies se mueven a través de los ríos subterráneos. Otro crustáceo de importancia, que habita en la franja kárstica, es el cangrejo de agua dulce de Puerto Rico, *Epilobocera sinuatifrons*, conocido localmente como Buruquena. Esta especie es endémica de Puerto Rico y es pescada frecuentemente por personas para su consumo. Puede crecer hasta lograr un carapacho de más de 7.5 cm de ancho (Erdman 1967). Al parecer, sus poblaciones están disminuyendo en la isla. La pesca excesiva, la deforestación y el uso de plaguicidas cerca de los cuerpos de agua son las mayores amenazas a la supervivencia de esta especie de cangrejo (Rivera 1994).

Aunque ninguna de estas especies está denominada como amenazada o en peligro de extinción, muchas poblaciones nativas de macrofauna acuática se han reducido en Puerto Rico debido a la construcción de

continua en la página 48

Tabla 9. Peces y crustáceos nativos que se encuentran en las aguas de la zona caliza del Norte de Puerto Rico. Las familias se presentan siguiendo el orden de García Ríos (1998). La información sobre las especies incluyen observaciones personales y citas de literatura publicada que incluyen: Vélez (1967a), Erdman (1967, 1984), Aranda y otros (1979), Nevárez y Villamil (1981), Negrón González (1986), González Azar (1992), Grana Raffucci (1993) y Bunkley Williams y Williams (1994).

FAMILIA / Nombre Científico	Nombre Común en Inglés	Nombre Común en Español
PECES--OSTEICHTHYES		
ELOPIDAE		
Elops saurus	Ladyfish	Macabí
MEGALOPIDAE		
Megalops atlantica	Tarpon	Sábalo
ANGUILLIDAE		
Anguilla rostrata	American Eel	Anguila
OPHICHTHIDAE		
Aplatophis chauliodus	Toothy Eel	Anguila Dientona
CLUPEIDAE		
Harengula clupeola	Scaled Sardine	Cascarúa
Opisthonema oglinum	Atlantic Thread Herring	Machuelo
ENGRAULIDAE		
Anchoa lamprotaenia	Longnose Anchovy	Bocúa
Anchoviella perfasciata	Flat Anchovy	Anchoa
Centragraulis edentulus	Whalebone Anchovy	Bocúa Rabiamarilla
EXOCOETIDAE		
Parexocoetus brachypterus	Shortfin Flyingfish	Pez Volador
HEMIRAMPHIDAE		
Hyporhamphus unifasciatus	Halfbeak	Babalú
BELONIDAE		
Belone raphidoma	Houndfish	Agujón
Strongylura marina	Atlantic Needlefish	Agujón
POECILLIDAE		
Poecilia vivipara	Top Minnow	Gupi
SYNGNATHIDAE		
Cosmocampus brachycephalus	Crested Pipefish	Pez Flauta Crestado
Oostethus brachyurus	Oppossum Pipefish	Pez Canguro
Sygnathus dunckersi	Pugnose Pipefish	Pez Flauta Hocicudo
CENTROPOMIDAE		
Centropomus ensiferus	Swordspine Snook	Róbalo
Centropomus parallelus	Little Snook	Róbalo
Centropomus pectinatus	Tarpon Snook	Róbalo
Centropomus undecimallis	Snook	Róbalo
SERRANIDAE		
Epinephelus itajara	Jewfish	Mero Batata
CARANGIDAE		
Caranx latus	Horse-eyed Jack	Jurel Ojón
Caranx hippos	Crevalle Jack	Jurel
Oligoplites saurus	Leather Jacket	Cueriduro
Trachinotus falcatus	Permit	Pámpano
Trachinotus glaucus	Palometa	Palometa
LUTJANIDAE		
Lutjanus apodus	Schoolmaster	Pargo Amarillo
Lutjanus cyanopterus	Cubera snapper	Pargo Mulato
Lutjanus griseus	Grey snapper	Pargo Prieto
Lutjanus jocu	Dog snapper	Pargo Dientón
Lutjanus synagris	Lane snapper	Arrayao
GERREIDAE		
Diapterus plumieri	Striped Mojara	Mojarra Espuelúa
Diapterus rhombeus	Rhombold Mojarra	Mojarreta
Eucinostomus gula	Silver jenny	Blanquilla
Eucinostomus melanopterus	Flagfin mojarra	Mojarra
Eucinostomus jonesii	Slender mojarra	Mojarra Fina
Gerres cinereus	Yellowfin Mojarra	Muniama
HAEMULIDAE		
Conodon nobilis	Barred Grunt	Berraco
Haemulon aurolineatum	Tomtate	Mulita
Haemulon chrysargyreum	Smallmouth Grunt	Corocoro
Haemulon sciurus	Bluestriped Grunt	Boquicolorao
Pomadasys corvinaeformis	Grunt	Viejo
Pomadasys croco	Burro Grunt	Burro Viejo
SCIAENIDAE		
Ophioscion adustus	West Indian Croaker	Corvino
Stellifer stellifer	Small Drum	Guineilla
EPHIPPIDAE		
Chaetodipterus faber	Atlantic Spadefish	Paguela
MUGILIDAE		
Agonostomus monticola	Mountain Mullet	Dajao
Joturus pichardi	Hognose Mullet	Liza Morón
Mugil curema	White Mullet	Jarrea
Mugil liza	Liza	Liza
Mugil tricodon	Fantail Mullet	Liza Abanico
SPHYRAENIDAE		
Sphyraena barracuda	Great Barracuda	Picúa
POLYNEMIDAE		
Polydactylus virginicus	Threadfin	Barbú
ELEOTRIDAE		
Dormitator maculatus	Fat Sleeper	Mapiro
Eleotris pisonis	Spinycheek Sleeper	Morón
Gobiomorus dormitor	Bigmouth Sleeper	Guabina
GOBIIDAE		
Awaous taiasica	River Gopi	Saga
Bathygobius soporator	Frillfin Goby	Gobio
Evorthodus lyricus	Lyre Gobi	Gobio
Gobiomorus dormitator	Bigmouth Sleeper	Gobio
Gobionellus boleosoma	Darter Goby	Gobio
Gobionellus oceanicus	Highfin Goby	Gobio
Guavina guavina	Goby	Gobio
Lophogobius cyprinoides	Crested Goby	Gobio
Sicydium plumieri	Sirajo Goby	Chupapiedra/Setí
TRICHIURIDAE		
Trichiurus lepturus	Atlantic Cuttlassfish	Machete
BOTHIDAE		
Citharichthys spilopterus	Bay Whiff	Lenguado
TETRAODONTIDAE		
Canthigaster rostratus	Sharpnose Puffer	Tamboril
Sphaeroides greeleyi	Caribbean Puffer	Tamboril
Sphaeroides spengleri	Bandtail Puffer	Tamboril
Sphaeroides testudineus	Checkered Puffer	Tamboril
SOLEIDAE		
Achirus lineatus	Lined Sole	Lenguado
Trinectes inscriptus	Scrawled Sole	Lenguado
CRUSTÁCEOS		
COENOBITIDAE		
Coenobita clypeata	Hermit Crab	Cobito
ATYIDAE		
Atya innocous	Shrimp	Guábara/Chágara
Atya lanipes	Sinuous-faced Shrimp	Guábara/Chágara
Atya scabra	Jonga Serrei Shrimp	Guábara/Chágara
Micratya poeyi	Compressed-faced Shrimp	Guábara/Chágara
Xiphocaris elongata	Long-faced Shrimp	Chirpi
PALAEMONIDAE		
Macrobrachium carcinus	Giant-hand Shrimp	Boquiguayo
Macrobrachium crenulatum	Pubescent-hand Shrimp	Camarón de Río
Macrobrachium faustinum	Pubescent-hand Shrimp	Camarón de Río
Macrobrachium heterochirus	Teeth-faced Shrimp	Camarón de Río
GRAPSIDAE		
Aratus pisonii	Small Elongated Crab	Juey/Cangrejo de Mangle
Goniopsis cruentata	Pentagonal-bodied Crab	Juey/Cangrejo de Mangle
Sesarma sp.	Square-bodied Crab	Juey/Cangrejo de Mangle
OCYPODIDAE		
Ocypode albicans	Ghost Crab	Cangrejo Fantasma
Ocypode quadrata	Ghost Crab	Cangrejo Fantasma
Uca burgersi	Fiddler Crab	Cangrejo Violinista
Uca rapax	Fiddler Crab	Cangrejo Violinista
PORTUNIDAE		
Callinectes danae	Long-spined Blue Crab	Cocolía
Callinectes ornatus	Wide-chested Blue Crab	Cocolía
Callinectes sapidus	Bidentate-faced Blue Crab	Cocolía
GECARCINIDAE		
Cardiosoma guanhumi	Common Land Crab	Palancú
Ucides cordatus	Land Crab	Juey Pelú
PSEODOTHELPHUSIDEA		
Epilobocera sinuatifrons	Freshwater Crab/Buruquena	Buruquena

continuación de la página 46

represas, extracción excesiva de agua, pesca ilegal, pobre calidad de agua y otros tipos de alteraciones a los ríos.

Invertebrados de las Cavidades

Peck (1974) estudió la fauna de invertebrados en 14 cavidades de Puerto Rico y encontró 78 especies silvestres, de las cuales 52 tenían un nombre de especie preciso. La distribución de estas clasificaciones taxonómicas incluían 23 oriundas del continente americano, 6 de las Antillas y 23 endémicas de Puerto Rico. De las endémicas, 16 son conocidas de hábitats no-cavernosos, mientras que las que no son endémicas están asociadas usualmente a cavidades en otras partes de su alcance distributivo. El noventa por ciento del total de la fauna es **troglofílica** y sólo dos por ciento es **troglobítica**. El 55 por ciento de la fauna son animales que se alimentan del guano, **detrívoros** y **herbívoros**, mientras que el 45 por ciento son depredadores. Peck (1974) enumeró las 78 clasificaciones taxonómicas que encontró y ofreció detalles de dónde se encontraban y de su historia natural.

En viajes subsiguientes a Puerto Rico, Peck estudió 5 cavidades adicionales y añadió 73 especies a su lista del 1974 (Peck 1981). Este trabajo adicional añadió 6 especies triglobíticas e informó un nuevo total de 151 especies de invertebrados de cavidades para Puerto Rico. Además, Peck encontró que 43 por ciento de las especies de la fauna de las cavidades de la zona caliza del Norte era similar a la de la zona caliza del Sur. El parecido se debió a que todas estas especies requerían un ambiente húmedo para su subsistencia. Peck destacó la cueva Los Chorros, 15 km al sur de Arecibo en la carretera estatal PR 10, por poseer una comunidad muy rica de fauna y, por lo tanto, merecer protección especial aún de los estudiantes de biología y otros visitantes casuales. Esta cavidad es pequeña, pero en ella habitan un milpiés y una cucaracha troglobíticas. Las muestras de guano contenían insectos heterópteros, escarabajos nitidúlidos, isópodos terrestres, hormigas, ciempiés, milpiés, 17 especies de ácaros y abundantes larvas de moscas, escarabajos (Ptiliidiae) y colémbolos.

Las listas de invertebrados de las cavidades hechas por Peck (1974, 1981) no incluyen los organismos de la isla de Mona (recuadro 1). Peck y Kukalova Peck (1981) publicaron una lista adicional con 46 especies de la isla de Mona. En el recuadro 1 incluimos algunas de las especies más importantes de esa lista.

Reptiles y Anfibios

La **herpetofauna** de Puerto Rico consta de por lo

continua en la página 50

Tabla 10. Peces de agua dulce introducidos a los cuerpos de agua de la zona caliza del Norte de Puerto Rico. La lista está basada en Erdman (1967, 1984), Nevarez y Villamil (1981), González Azar (1992), Grana Raffucci (1993) y Bunkley Williams y Williams (1994). El orden de las especies es según García Ríos (1998).

FAMILIA / Nombre científico	Nombre Común en Inglés	Nombre Común en Español	Fecha de Introducción	Origen Geográfico
CLUPEIDAE				
Dorasoma petenense	Threadfin Shad	Sardina de Agua Dulce	1963	Georgia, EE.UU.
CYPRINIDAE				
Carassius aratus	Goldfish	Pez Dorado	1900 ¿?	China
Pimephales promelas	Fathead Minnow	Mino Cabezón	1957	América del Norte
ICTALURIDAE				
Ameirus catus	White Catfish	Pez Gato	1938	América del Norte
Ameirus nebulosus	Brown Bullhead	Torito	1916	América del Norte
Ictalarus marmoratus	Marbled Bullhead	Torito Barbudo	1946	América del Norte
Ictalarus punctatus	Channel Catfish	Bagre	1938	América del Norte
APLOCHEILIDAE				
Rivulus marmoratus	Rivulus	Killi	1935	Cuba ¿?
POECILLIDAE				
Gambusia affinis	Mosquitofish	Pez Mosquito	1914	América del Norte
Poecilia reticulata	Guppy	Gupi	1935 ¿?	América del Sur
Xiphophorus helleri	Swordstail	Plati	1935	México
Xiphophorus maculatus	Southern Platyfish	Plati	1935	México
Xiphophorus variatus	Variable Platyfish	Plati	--	
CENTRARCHIDAE				
Lepomis auritus	Redbreast Sunfish	Chopa Pechicolorada	1957	América del Norte
Lepomis gulosus	Warmouth	Chopa Negra	--	--
Lepomis macrochirus	Bluegill Sunfish	Chopa Caracolera	1916	América del Norte
Lepomis microlopus	Redear Sunfish	Chopa	1957	América del Norte
Micropteris coosae	Redeye Bass .	Lobina Ojicolorada	1958	Sureste de los EE.UU.
Micropteris salmoides	Largemouth Bass	Lobina	1946	América del Norte
CICHLIDAE				
Astronotus ocellatus	Oscar	Oscar	--	--
Cichla ocellaris	Peacock Bass	Tucunaré o Tucunari	1967	América del Sur
Tilapia aurea	Golden Tilapia	Tilapia Azul	--	--
Tilapia urolepis	Redeyed Tilapia	Tilapia Ojicolorada	--	--
Tilapia mossambica	Tilapia	Tilapia Prieta	1958	Mozambique, Africa
Tilapia rendalli	Blue Tilapia	Tilapia Moteada	--	--

Tabla 11. Lista de anfibios y reptiles de las zonas calizas del Norte y del Sur. Se indica el orden de familias según la proximidad taxonómica. La distribución de la especie (D) en las zonas calizas de Puerto Rico se clasifica en: (1) si es de la zona caliza del Norte, (2) si es de la zona caliza del Sur, o (3) si es de ambas zonas calizas. Las descripciones de frecuencia para las especies en la zona caliza del Norte se basan en observaciones hechas por Puente Rolón desde 1994. Común = vista o escuchada en todas las visitas, ocasional = se pudo ver o escuchar en por lo menos cinco visitas al año y rara = vista en menos de cinco visitas al año. Para las especies en la zona caliza del Sur, la frecuencia se basa en una apreciación general sobre su estado.

FAMILIA/Especie	***D***	Nombre Común en Inglés	Nombre Común en Español	***Frecuencia***
		ANFIBIOS		
BUFONIDAE				
Peltophryne lemur	3	Puerto Rican Crested Toad	Sapo Concho de Puerto Rico	Rara
Bufo marinus	3	Cane toad, Marine Toad	Sapo Común	Común
LEPTODACTYLIDAE				
Leptodactylus albilabris	3	Common White-lipped Frog	Ranita de Labio Blanco	Común
Eleutherodactylus antillensis	3	Field Coqui	Coquí Churí	Común
Eleutherodactylus brittoni	3	Grass Coqui	Coquí de las Hierbas	Ocasional
Eleutherodactylus cochranae	3	Cochran's Coqui	Coquí Pitito	Común
Eleutherodactylus coqui	3	Common Coqui	Coquí Común	Común
Eleutherodactylus richmondi	1	Richmond's Coqui	Coquí Caoba	Ocasional
Eleutherodactylus wightmanae	1	Melodious Coqui	Coquí Melodioso	Rara
HYLIDAE				
Hyla cinerea	1	Green Tree Frog	Rana Verde	Ocasional
Osteopilus septentrionalis	1	Cuban Tree Frog	Rana Cubana	Ocasional
Scinax rubra	1	Scinax	Rana Suramericana	Rara
RANIDAE				
Rana catesbeiana	1	Bullfrog	Rana Toro	Ocasional
Rana grylio	1	Pig frog	Rana Grillo o Rana Cerdo	Ocasional
		REPTILES		
EMYDIDAE				
Trachemys stejnegeri	3	Puerto Rican Freshwater Turtle	Jicotea Puertorriqueña	Ocasional
DERMOCHELIDAE				
Dermochelys coriacea	3	Leatherback Turtle	Tinglar	Rara
CHELONIDAE				
Chelonia mydas	3	Green Turtle	Tortuga Verde o Pejeblanco	Rara
Eretmochelys imbricata	3	Hawksbill Turtle	Carey de Concha	Rara
CROCODYLIDAE				
Caiman crocodylus	1	North American Cayman	Caimán o Cocodrilo	Rara
AMPHISBAENIDAE				
Amphisbaena caeca	3	Common Legless Lizard	Culebrita Ciega Común	Ocasional
Amphisbaena schmidti	3	Schmidt's Legless Lizard	Culebrita Ciega de Schmidt	Ocasional
Amphisbaena xera	2	Xeric Legless Lizard	Culebrita Ciega de Bosque Seco	--
ANGUIIDAE				
Diploglossus pleii	3	Puerto Rican Galliwasp	Culebra de Cuatro Patas	Ocasional
GEKKONIDAE				
Hemidactylus brooki	3	Greater Antillian Gecko	Salamanquesa Casera	Común
Hemidactylus mabouia	3	African Gecko	Salamanquesa Fantasma	Ocasional
Phyllodactylus wirshingi	2	Flower-pot Gecko	Salamanquesa Bandeada	--
Sphaerodactylus klauberi	1	Klauber's Gecko	Salamanquita Negra	Común
Sphaerodactylus macrolepis	3	Coastal Gecko	Salamanquita Común	Común
Sphaerodactylus nicholsi	3	Nichol's Gecko	Salamanquita Pigmea	Común
Sphaerodactylus roosevelti	2	Roosevelt's Gecko	Salamanquita del Bosque Seco	--
Sphaerodactylus townsendi	2	Townsend's Gecko	Salamanquita del Sureste	--
POLYCHROTIDAE				
Anolis cooki	2	Dry-forest Anole	Lagartijo de Bosque Seco	--
Anolis cristatellus	3	Common Anole	Lagartijo Común	Común
Anolis cuvieri	3	Giant Green Anole	Lagarto Verde/Chipojo	Común
Anolis evermanni	3	Small Green Anole	Lagartijo Verde	Ocasional
Anolis gundlachi	1	Banded Anole	Lagartijo Barba Amarilla	Común
Anolis krugi	3	Orange-dewlap Anole	Lagartijo Jardinero de Montaña	Ocasional
Anolis occultus	1	Dwarf Anole	Lagartijo Enano	Ocasional
Anolis poncensis	2	Southern Anole	Lagartijo Jardinero del Sur	Común
Anolis pulchellus	3	Grass Anole	Lagartijo Jardinero	Común
Anolis stratulus	3	Dark-marked Anole	Lagartijo Manchado	Común
IGUANIDAE				
Iguana iguana	3	Green Iguana	Iguana Verde o Gallina de Palo	Común
SCINCIDAE				
Mabuya mabuya sloani	3	Skink	Lucía o Santa Lucía	Rara
TEIIDAE				
Ameiva exsul	3	Common Ground Lizard	Siguana Común	Rara
Ameiva wetmorei	2	Blue-tailed Ground Lizard	Siguana de Rabo Azul	Rara
BOIDAE				
Epicrates inornatus	3	Puerto Rican Boa	Boa Puertorriqueña o Culebrón	Ocasional
COLUBRIDAE				
Alsophis portoricensis	3	Puerto Rican Racer	Culebra Corredora	Común
Arrhyton exiguum	3	Puerto Rican Ground Snake	Culebra de Jardín	Ocasional
TYPHLOPIDAE				
Typhlops granti	2	Southern Blind Snake	Víbora de Grant	--
Typhlops hypomethes	1	University's Blind Snake	Víbora Universitaria	Ocasional
Typhlops richardi	3	Richard's Blind Snake	Víbora Común	Ocasional
Typhlops rostellatus	3	Common Blind Snake	Víbora de Pico	Ocasional

continuación de la página 48

introducidas. Nosotros hallamos 51 especies (17 familias) de anfibios y reptiles para la zona caliza del Norte (tabla 11). Siete familias - el 41 por ciento - están representadas por sólo una especie, 4 familias - el 24 por ciento - están representadas por 2 especies, dos familias - el 12 por ciento - están representadas por 3 especies y 3 familias - 6 por ciento cada una - están representadas por 4, 8 y 11 especies, respectivamente. Los reptiles son el grupo dominante, con 38 especies (67 por ciento) en 13 familias (foto 35). En términos de abundancia, 38 por ciento de las especies se consideran comunes, 48 por ciento son ocasionales y 15 por ciento son especies raras.

Encontramos seis especies y dos familias más de anfibios en la zona caliza del Norte que en la zona caliza del Sur, pero todos los que se encontraban en el sur también estaban en el norte (tabla 11). Los reptiles tienen una familia menos (Crocodylidae) en la zona caliza del Sur. Cuatro especies aparecen solo en la zona caliza del Norte, mientras que ocho especies aparecen solo en la zona caliza del Sur. Treinta y dos especies (63 por ciento) de la herpetofauna enumerada se encuentra en ambas zonas, mientras que solo cuatro especies (8 por ciento) se encuentran en el sur.

El Sapo Concho (*Peltophryne lemur*) es endémico y está restringido a la zona caliza costera (Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE.UU. 1992b, Rivero 1998). Es el único anfibio denominado como en peligro de extinción tanto por el Estado Libre Asociado de Puerto Rico como por el gobierno federal. En la costa norte, el centro de distribución de esta especie es Quebradillas, mientras que en la costa sur está en el Bosque Estatal de Guánica. El área de reproducción de la población del sur se protege mediante patrullaje y se prohibe el acceso al público (Miller 1985, Moreno 1991). La población del norte está dispersa entre varias localidades, mayormente en terrenos privados (García Díaz 1967, Rivero y otros 1980, Rivero y Seguí Crespo 1992, Hernández Prieto 2001), y por lo tanto, no está protegida. Un esfuerzo de dos años para encontrar adultos de esta especie en o cerca de Quebradillas resultó infructuoso, aún cuando en dos ocaciones se escucharon machos cantar y se observaron renacuajos con cierta regularidad (Hernández Prieto 2001). El asegurar la supervivencia de esta especie es de importancia crítica, ya que existe un estudio que indica que hay suficientes diferencias genéticas entre las poblaciones del Norte y del Sur como para ameritar una reevaluación taxonómica de las mismas (Goebel 1996).

La distribución de una de las especies más terrestres de *Eleutherodactylus*, el Coquí Caoba - *E. richmondi* - incluye varios municipios dentro de la franja kárstica (Rivero 1998, Joglar 1998). Esta especie se está reduciendo en las regiones volcánicas muy húmedas de Puerto Rico (Joglar y Burrowes 1996). Un censo de anfibios y reptiles que se efectuó recientemente reveló que hay nuevas poblaciones en Arecibo y Ciales (foto 36). El Coquí Melodioso - *E. wightmanae* - es una especie común en la región volcánica (Rivero 1998) pero también se cree que está declinando (Joglar y Burrowes 1996). Se encontró una población de *E. wightmanae* en el Bosque

Foto 35. *Anolis gundlachi*. Foto de L. Miranda Castro.

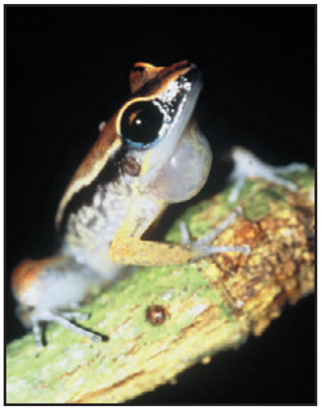

Foto 36. Coquí Caoba (*Eleutherodactylus richmondi*). Foto de A. Puente Rolón.

Estatal Río Abajo y otra entre Arecibo y Utuado. Estos datos representan las primeras instancias registradas de estas especies en la franja kárstica.

Una de las especies más raras de reptiles de la zona caliza del Norte es *Mabuya mabuya sloani*, que es el único eslizón conocido en Puerto Rico (Rivero 1998) y está legalmente protegido por el Estado Libre Asociado de Puerto Rico. Se observaron cerca de 10 individuos de esta especie en Isabela en 1991 (M. González, comunicación personal). Otra especie presente es el Lagarto Verde (*Anolis cuvieri*), que exhibe dos fases de coloración. En la fase más común, el cuerpo, el rabo y las extremidades son verde esmeralda o verde amarillento (foto 37). La fase menos común es gris o verde grisáceo con manchas marrón (Rivero 1998). Ambas fases se observan en la zona caliza del Norte y hay evidencia de reproducción entre individuos de fases diferentes. La única tortuga endémica, *Trachemys stejnegeri*, era común, pero sus números se han reducido tanto que ahora se considera ocasional.

Foto 37. *Anolis cuvieri* en su fase verde. Foto de L. Miranda Castro.

Tres tortugas marinas, el Tinglar (*Dermochelys coriacea*), la Tortuga Verde (*Chelonia mydas*) y el Carey (*Eretmochelys imbricata*) anidan con regularidad en las costas y playas de la zona kárstica, tales como las de Tortuguero, Arecibo, Quebradillas, Isabela, Aguadilla, Guánica y Lajas (Rivero 1998). Todas estas especies están designadas como especies en peligro de extinción a nivel local y federal, y además están protegidas por tratados internacionales.

La única especie de reptil endémico en peligro de extinción a ambos niveles, local y federal, es la Boa Puertorriqueña (*Epicrates inornatus*) (recuadro 11, foto 38). A pesar de que esta especie se puede encontrar en una gran variedad de hábitats, desde los bosques montanos muy húmedos hasta los bosques subtropicales secos, se encuentra con más frecuencia en la franja kárstica (Rivero 1998). La reducción de la población de la Boa se atribuye mayormente a los impactos humanos. Los factores que más afectan a esta especie son la pérdida de hábitat, depredación por la mangosta, su captura para la extracción de aceite y la matanza por temor a las culebras creadas por prejuicios religiosos o culturales (Reagan y Zucca 1982, Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE.UU. 1986).

Foto 38. Boa Puertorriqueña (*Epicrates inornatus*). Foto de L. Miranda Castro.

El Lagartijo de Bosque Seco (*Anolis cooki*) y la Siguana (*Ameiva wetmorei*) son dos especies de preocupación tanto para el gobierno federal como el local, pero que aún no están protegidas por la Ley de Especies en Peligro de Extinción. Ambas especies están amenazadas por: la destrucción del hábitat y la aparente competencia y desplazamiento en áreas

Recuadro 11. La Boa Puertorriqueña

Las boas del género *Epicrates* se encuentran en el neotrópico desde Costa Rica hasta la Argentina y en las Antillas Occidentales. La Boa Puertorriqueña, *Epicrates inornatus*, es la culebra nativa de mayor tamaño de la Isla. Grant (1933) hizo la primera mención de su aparente escasez en Puerto Rico. Los hábitos de secretividad y los colores sigilosos de esta especie, aunado al terreno escarpado y bosque denso que habitan, hacen muy difícil el estudio de sus individuos por periodos de tiempo prolongados. Por esta razón se escogió la radiotelemetría como técnica de investigación para estudiar a la boa en la Reserva de Mata de Plátano.

La Cueva de los Culebrones queda en esta reserva, a 7 km al suroeste de Arecibo, Puerto Rico. Las observaciones sobre los hábitos alimentarios de la boa fueron hechas a la entrada de la cueva, a partir de una hora antes de la puesta del sol hasta una hora luego del amanecer. Las horas de caza variaron desde las 17:45 a las 06:00, pero las horas más activas fueron entre 19:00 y 24:00. El tiempo promedio de consumo fue de 12.53 minutos. La radiotelemetría se utilizó para delimitar el alcance de su hábitat, determinar su actividad e identificar sus patrones de movimiento. A once culebras (cinco machos y seis hembras) se le instalaron transmisores. El método del polígono convexo mínimo fue utilizado para estimar la extensión del hábitat.

La distancia promedio del hábitat para las hembras fue de 7,800 m^2 mientras que para los machos fue de 5,000 m^2. El área promedio utilizada por las hembras durante el periodo no reproductivo fue de 22,119 m^2 y sólo de 1,326 m^2 para los machos. Durante el periodo reproductivo, las hembras con transmisores utilizaron un área media de 16,940 m^2 mientras que todos los machos usaron 18,500 m^2. Diez de las culebras rastreadas regresaron por lo menos dos veces a la cueva. Las hembras mostraron actividad en un 29% de las observaciones, mientras que los machos estuvieron activos en un 36% de las observaciones. No encontramos diferencias significativas por sexo en el tamaño del hábitat de la boa, aunque si se observó una tendencia a que las hembras cubrieran un rango mayor de área para hábitat.

donde son **simpátricos** con sus **congéneres** - con *Anolis cristatellus* en el caso de *A. cooki* (Hertz 1992; Ortiz 1979, 1985; Ortiz y Jenssen 1982), y con *Ameiva exsul* en el caso de *A. wetmorei* (Rodríguez Ramírez 1991, 1994).

Aves

Para las zonas calizas del Norte y del Sur enumeramos 223 especies de aves pertenecientes a 46 familias (tabla 12). Ciento noventa y ocho de estas especies se encuentran en ambas zonas, 17 sólo se encuentran en la zona caliza del Norte y 8 sólo se encuentran en la zona caliza del Sur.

La zona caliza del Norte generalmente muestra mayor diversidad debido a que existe mayor cantidad de datos registrados para ese lugar y la información sobre especies migratorias e introducidas está disponible. Aún así, el número de especies de aves en la zona caliza del Sur es casi igual al del norte. En la zona caliza del Norte se encuentran seis especies en peligro de extinción, mientras que en la zona caliza del Sur hay siete. Las familias con mayor número de especies son Scolopacidae (25 especies), Parulidae (22 especies) y Laridae (18 especies). Diecisiete familias de aves están representadas por sólo una especie. Las especies documentadas se dividen casi igualmente entre las residentes (112 especies) y las migratorias (111 especies). Incluimos además, 29 especies forasteras mayormente finches de la

continua en la página 56

Tabla 12. Lista de especies de aves de la montaña y de la costa reportadas para las zonas calizas del Norte y del Sur. La distribución de la especie (D) en las zonas calizas de Puerto Rico se clasifica en: (1) si aparece sólo en la región caliza del norte; (2) si aparece sólo en la región caliza del sur; y (3) si está presente en ambos lugares. El estado de las especies se describe como END = endémico, RN = Residente nidificante, RNN = Residente no nidificante, MN = Migrante nidificante, MNN = Migrante no-nidificante, EPE = Especie en peligro de extinción (o subespecie endémica), EX = extirpada e IN = introducida. De estado incierto se indica con "?". La lista está organizada de acuerdo a la lista de cotejo del 1998 para las Aves de Norte América de la Sociedad Ornitológica Americana.

FAMILIA/Especie	Nombre Común en Inglés	Nombre Común En Español	D	Estado
PODICIPEDIDAE				
Tachybaptus dominicus	Least Grebe	Tigua	3	RN
Podilymbus podiceps	Pied Billed Grebe	Zaramago, Chirre de Altura	3	RN
PHAETONTIDAE				
Phaeton lepturus	White-tailed Tropicbird	Rabijunco Coliblanco	3	MN
SULIDAE				
Sula leucogaster	Brown Booby	Boba Parda	3	RN
PELECANIDAE				
Pelecanus occidentalis	Brown Pelican	Pelícano Pardo	3	RN
PHALACROCORACIDAE				
Phalacrocorax olivaceus	Double-crested Cormorant	Cormorán Crestado	3	MNN
FREGATIDAE				
Fregata magnificens	Magnificient Frigatebird	Tijerilla, Fragata Magnífica, Rabijunco	3	RN
ARDEIDAE				
Ardea alba	Great Egret	Garza Real	3	RN
Ardea herodias	Great Blue Heron	Garzón Cenizo	3	MNN
Bubulcus ibis	Cattle Egret	Garza Ganadera	3	RN
Butorides striatus	Green-backed Heron	Martinete	3	MN
Egretta caerulea	Little Blue Heron	Garza Azul	3	RN
Egretta garzetta	Little Egret	Garza Común	3	MNN
Egretta thula	Snowy Egret	Garza Blanca	3	RN
Egretta tricolor	Tricolored Heron	Garza Pechiblanca	3	RN
Ixobrychus exilis	Least Bittern	Martinetito	3	RN
Nycticorax nycticorax	Black-crowned Night Heron	Yaboa Real	3	RN
Nycticorax violaceus	Yellow-crowned Night Heron	Yaboa Común	3	RN
THRESKIORNITHIDAE				
Plegadis falcinellus	Glossy Ibis	Ibis Lustroso	3	MNN
CATHARTIDAE				
Cathartes aura	Turkey Vulture	Aura Tiñosa	2	RN, IN
ANATIDAE				
Branta canadensis	Canada Goose	Ganso Canadiense	1	MNN
Anas acuta	Northern Pintail	Pato Pescuecilargo	1	MNN
Anas americana	American Wigeon	Pato Cabeciblanco Ame.	3	MNN
Anas bahamensis	White-cheeked Pintail	Pato Quijada Colorada	3	RN
Anas discors	Blue-winged Teal	Pato Zarcel	3	MNN
Anas platyrhynchos	Mallard	Pato Cabeciverde	3	MNN
Anas rubripes	American Black Duck	Pato Oscuro	3	MNN
Anas strepera	Gadwall	Pato Gris	3	MNN
Aythia affinis	Lesser Scaup	Pato Pechiblanco	1	MNN
Aythia collaris	Ring-necked Duck	Pato Acollarado	3	MNN
Aythia valisineria	Canvasback	Pato Lomiblanco	1	MNN

continua en la siguiente página

FAMILIA/Especie	Nombre Común en Inglés	Nombre Común En Español	D	Estado
Dendrocygna arborea	West Indian Whistling Duck	Chiriría Caribeña	1	RN
Dendrocygna autumnalis	Fulvous Tree Duck	Chiriría Bicolor	2	RN
Lophodytes cucullatus	Hooded Merganser	Mergansa Encapuchada	2	MNN
Oxyura dominica	Masked Duck	Pato Dominico	3	RN
Oxyura jamaicensis	Ruddy Duck	Pato Chorizo	3	RN
ACCIPITRIDAE				
Pandion haliaetus	Osprey	Aguila Pescadora	3	MNN
Accipiter striatus venator	Puerto Rican Sharp-shinned Hawk	Falcón de Sierra	3	RN, EPE
Buteo jamaicensis	Red-tailed Hawk	Guaraguao Colirrojo	3	RN
Buteo platypterus brunnescens	Puerto Rican broad-winged Hawk	Guaraguao de Bosque	3	RN, EPE
Circus cyaneus	Northern Harrier	Gavilán de Ciénaga	1	MNN
FALCONIDAE				
Falco columbarius	Merlin	Falcón Migratorio	3	MNN
Falco peregrinus	Peregrine Falcon	Falcón Peregrino	3	MNN, EPE
Falco sparverius	American Kestrel	Falcón Común	3	RN
PHASIANIDAE				
Gallus gallus	Red Junglefowl	Gallo/Gallina Silvestre	3	RN, IN
NUMIDIDAE				
Numida meleagris	Helmeted Guineafowl	Guinea Torcaz	3	RN, IN
RALLIDAE				
Gallinula chloropus	Common Moorhen	Gallareta Común	3	RN
Fulica americana	American Coot	Gallinazo Americano	3	MNN
Fullica caribaea	Caribbean Coot	Gallinazo Caribeño	3	MN
Porphyrula martinica	Purple Gallinule	Gallareta Azul	3	RN
Porzana carolina	Sora Rail	Gallito Sora	3	RN
Porzana flaviventer	Yellow-breasted Crake	Gallito Amarillo	3	MNN
Rallus longirostris	Clapper Rail	Pollo de Mangle	3	RN
ARAMIDAE				
Aramus guarauna	Limpkin	Carrao	3	RN, EX
CHARADRIIDAE				
Charadrius alexandrinus	Snowy Plover	Chorlo Blanco	2	MN
Charadrius melodus	Pipping Plover	Chorlo Melódico	3	MNN
Charadrius semipalmatus	Semipalmated Plover	Chorlo Acollarado	3	MNN
Charadrius vociferus	Killdeer	Chorlo Sabanero	3	RN
Charadrius wilsonia	Wilson's Plover	Chorlo Marítimo	3	RN
Pluvialis dominica	American Golden Plover	Chorlo Dorado	1	MNN
Pluvialis squatarola	Black-bellied Plover	Chorlo Cabezón	3	MNN
HAEMATOPODIDAE				
Haematopus palliatus	American Oystercatcher	Ostrero Americano	3	MNN
RECURVIROSTRIDAE				
Hypomatopus mexicanus	Black-necked Stilt	Viuda Mexicana	3	MN
SCOLOPACIDAE				
Actitis macularia	Spotted Sandpiper	Playero Coleador	3	MNN
Arenaria interpres	Ruddy Turnstone	Playero Turco	3	MNN
Bartramia longicauda	Upland Sandpiper	Playero Pradero	3	MNN
Calidris alba	Sanderling	Playero Arenero	3	MNN
Calidris alpina	Dunlin	Playero Espalda Colorada	3	MNN
Calidris canutus	Red Knot	Playero Gordo	3	MNN
Calidris ferruginea	Curlew Sandpiper	Playero Zarapitín	3	MNN
Calidris fuscicollis	White-rumped Sandpiper	Playero Rabadilla Blanca	3	MNN
Calidris himantopus	Stilt Sandpiper	Playero Patilargo	1	MNN
Calidris mauri	Western Sandpiper	Playero Occidental	3	MNN
Calidris melanotos	Pectoral Sandpiper	Playero Pectoral	3	MNN
Calidris minutilla	Least Sandpiper	Playerito Menudillo	3	MNN
Calidris pusilla	Semipalmated Sandpiper	Playerito Gracioso	3	MNN
Catoptrophorus semipalmatus	Willet	Playero Aliblanco	3	MNN
Gallinago gallinago	Wilson's Snipe	Becasina Común	3	MNN
Limnodromus griseus	Short-billed Dowitcher	Agujeta de Pico Corto	3	MNN
Limosa fedoa	Marbled Godwit	Barga Canela	3	MNN
Micropalama himantopus	Stilt Sandpiper	Playero Patilargo	3	MNN
Numenius phaeopus	Ruddy Turnstone	Playero Turco	3	MNN
Phalaropus lobatus	Red-necked Phalarope	Falaropo Picofino	3	MNN
Phalaropus tricolor	Wilson's Phalarope	Falaropo Tricolor	3	MNN
Tringa flavipes	Lesser Yellowlegs	Playero Guineilla Pequeño	3	MNN
Tringa melanoleuca	Greater Yellowlegs	Playero Guineilla Grande	3	MNN
Tringa solitaria	Solitary Sandpiper	Playero Solitario	3	MNN
Tryngites subruficollis	Buff-breasted Sandpiper	Playero Canela	3	MNN

continua en la siguiente página

FAMILIA/Especie	*Nombre Común en Inglés*	*Nombre Común En Español*	*D*	*Estado*
LARIDAE				
Stercorarius pomarinus	Pomarine Jaeger	Págalo Pomarino	1	MNN
Anous stolidus	Brown Noody	Cervera Parda	3	MN
Chlidonias niger	Black Tern	Charrán Ceniza	3	MNN
Larus argentatus	Herring Gull	Gaviota Argéntea	3	MNN
Larus atricilla	Laughing Gull	Gaviota Cabecinegra	3	MNN
Larus delawarensis	Ring-billed Gull	Gaviota Piquianillada	3	MNN
Larus marinus	Great Black-backed Gull	Gaviota Marina	3	MNN
Larus rudibundus	Common Black-headed Gull	Gaviota Cabecinegra Forastera	3	MNN
Rhynchops niger	Black Skimmer	Rayador Americano	3	MNN
Sterna anaethetus	Bridled Tern	Charrán Monje	3	RN
Sterna antillarum	Least Tern	Charrán Pequeño	3	MNN
Sterna caspia	Caspian Tern	Charrán Caspio	3	MNN
Sterna dougallii	Roseate Tern	Palometa	3	RN
Sterna fuscata	Sooty Tern	Charrán Oscuro	3	MNN
Sterna hirundo	Common Tern	Charrán Común	3	MNN
Sterna maxima	Royal Tern	Charrán Real	3	RN
Sterna nilotica	Gull-billed Tern	Charrán de Pico Corto	3	MNN
Sterna sandwichensis	Sandwich Tern	Charrán de Pico Agudo	3	MNN
COLUMBIDAE				
Columba inornata wetmorei	Puerto Rican plain pigeon	Paloma Sabanera	3	RN, EPE
Columba leucocephala	White-crowned Pigeon	Paloma Cabeciblanca	3	RN
Columba livia	Rock Dove	Paloma Doméstica	3	RN, IN
Columba squamosa	Scaly-naped Pigeon	Paloma Turca	3	RN
Columbina passerina	Common Ground Dove	Rolita	3	RN
Zenaida asiatica	White-winged Dove	Tórtola Aliblanca	3	RN
Zenaida aurita	Zenaida Dove	Tórtola Cardosantera	3	RN
Zenaida macroura	Mourning Dove	Tórtola Rabilarga	3	MNN
Streptopelia risoria	Ringed Turtle Dove	Tórtola Collarina	3	RN, IN
Geotrygon chrysia	Key West Quail Dove	Paloma Perdiz Aurea	3	RN
Geotrygon montana	Ruddy Quail Dove	Paloma Perdiz Rojiza	3	RN
Geotrygon mystacea	Bridled Quail Dove	Paloma Perdiz de Martinica	3	RN
PSITTACIDAE				
Amazona amazonica	Orange-winged Parrot	Cotorra Alianaranjada	1	RN, IN
Amazona ocrocephala	Yellow-crowned Parrot	Cotorra Cabeciamarilla	1	RN, IN
Amazona vittata	Puerto Rican Parrot	Cotorra Puertorriqueña	3	RN, END, EPE
Amazona ventralis	Hispaniolan Parrot	Cotorra de la Española	3	RN, IN
Amazona viridigenalis	Red-crowned Parrot	Cotorra Coroniroja	3	RN, IN
Aratinga canicularis	Orange-fronted Conure	Periquito Frentianaranjado	1	RN, IN
Aratinga chloroptera	Hispaniolan Conure	Periquito de la Española	3	RN, IN
Aratinga erythrogenys	Cherrry Head Conure	Periquito Frentirrojo	3	RN, IN
Brotogeris versicolorus	White-winged Parakeet	Periquito Aliamarillo	1	RN, IN
Myopsitta monachus	Monk Parakeet	Perico Monje	3	RN, IN
Nandayus nenday	Black-hooded Parakeet	Periquito Ñanday	3	RN, IN
CUCULIDAE				
Coccyzus americanus	Yellow Billed Cuckoo	Pájaro Bobo Pechiblanco	3	RN
Coccyzus minor	Mangrove Cuckoo	Pájaro Bobo Menor	3	RN
Saurothera vieilloti	Puerto Rican Lizard Cuckoo	Pájaro Bobo Mayor	3	RN, END
Crotophaga ani	Smooth-billed Ani	Judío, Garrapatero	3	RN
STRIGIDAE				
Asio flammaeus	Short-eared Owl	Múcaro Real	3	RN
Otus nudipes	Puerto Rican Screech Owl	Múcaro de Puerto Rico	3	RN, END
CAPRIMULGIDAE				
Chordeiles gundlachi	Antillean Nighthawk	Querequequé Antillano	3	MN
Caprimulgus carolinensis	Chuck Will's Widow	Guabairo de la Carolina	3	MNN
Caprimulgus noctitherus	Puerto Rican Nightjar	Guabairo de Puerto Rico	2	RN, END, EPE
APODIDAE				
Cypseloides niger	Black Swift	Vencejo Negro	3	MN
TROCHILIDAE				
Anthracothorax dominicus	Antillean Mango	Zumbador Dorado	3	RN
Anthracothorax viridis	Puerto Rican Mango	Zumbador Verde	3	RN, END
Archilochus colubris	Ruby-throated Hummingbird	Zumbadorcito Gorgirrojo	3	MNN
Chlorostilbon maugaeus	Puerto Rican Emerald	Zumbadorcito de Puerto Rico	3	RN, END
Eulampis holocericeus	Green-throated Carib	Zumbadorcito de Pecho Azul	3	RN
Orthorhynchus cristatus	Antillean Crested Hummingbird	Zumbadorcito Crestado	3	RN
ALCEDINIDAE				
Ceryle alcyon	Belted Kingfisher	Martín Pescador Norteño	3	RN

continua en la siguiente página

FAMILIA/Especie	Nombre Común en Inglés	Nombre Común En Español	D	Estado
TODIDAE				
Todus mexicanus	Puerto Rican Tody	San Pedrito	3	RN, END
PICIDAE				
Melanerpes portoricensis	Puerto Rican Woodpecker	Carpintero de Puerto Rico	3	RN, END
Spirapicus varius	Yellow-bellied Sapsucker	Carpintero de Paso	1	MNN
TYRANNIDAE				
Elaenia martinica	Caribbean Elaenia	Juí Blanco	3	RN
Contopus portoricensis	Puerto Rican Pewee	Bobito de Puerto Rico	3	RN, END
Myiarchus antillarum	Puerto Rican Flycatcher	Juí de Puerto Rico	3	RN, END
Tyrannus caudifasciatus	Loggerhead Kingbird	Clérigo	3	
Tyrannus dominicensis	Grey Kingbird	Pitirre Gris	3	RN
VIREONIDAE				
Vireo altiloquus	Black-whiskered Vireo	Vireo Julián Chiví	3	MN
Vireo flavifrons	Yellow-throated Vireo	Vireo Gargantiamarillo	3	MNN
Vireo griseus	White-eyed Vireo	Vireo Ojiblanco	3	MNN
Vireo latimeri	Puerto Rican Vireo	Bienteveo de Puerto Rico	3	RN, END
Vireo olivaceus	Red-eyed Vireo	Vireo Ojirrojo	3	MNN
CORVIDAE				
Corvus leucognaphalus	White-necked Crow	Cuervo	3	RN, EX
HIRUNDINIDAE				
Hirundo fulva	Cave Swallow	Golondrina de Cuevas	3	RN
Hirundo rustica	Barn Swallow	Golondrina Horquillada	3	MNN
Progne dominicensis	Caribbean Martin	Golondrina de Iglesias	3	MN
Progne subis	Purple Martin	Golondrina Púrpura	3	MN
Riparia riparia	Bank Swallow	Golondrina Parda	3	MNN
MUSCICAPIDAE				
Catharus bicknelli	Bicknell's Thrush	Zorzal de Bicknell	3	MNN
Turdus plumbeus	Red-legged Thrush	Zorzal Patirrojo	3	RN
MIMIDAE				
Margarops fuscatus	Pearly-eyed Thrasher	Zorzal Pardo	3	RN
Mimus polyglottos	Northern Mockingbird	Ruiseñor	3	RN
Dumetella carolinensis	Catbird	Maullador Gris	3	MNN
PARULIDAE				
Dendroica adelaidae	Adelaide's Warbler	Reinita Mariposera	3	RN, END
Dendroica caerulescens	Black-throated Blue Warbler	Reinita Azul	3	MNN
Dendroica coronata	Yellow-rumped Warbler	Reinita Coronada	3	MNN
Dendroica discolor	Prairie Warbler	Reinita Galana	3	MNN
Dendroica magnolia	Magnolia's Warbler	Reinita Manchada	3	MNN
Dendroica palmarum	Palm Warbler	Reinita Palmera	3	MNN
Dendroica petechia	Yellow Warbler	Reinita Amarilla, Canario de Mangle	3	RN
Dendroica striata	Blackpoll Warbler	Reinita Rayada	3	MNN
Dendroica tigrina	Cape May warbler	Reinita Tigre	3	MNN
Dendroica virens	Black-throated Green Warbler	Reinita Verdosa	3	MNN
Geothlypis trichas	Common Yellowthroat	Reinita Picatierra	3	MNN
Helmitheros vermivorus	Worm-eating Warbler	Reinita Gusanera	3	MNN
Mniotilta varia	Black and White Warbler	Reinita Trepadora	3	MNN
Oporornis formosus	Kentucky Warbler	Reinita de Kentucky	3	MNN
Parula americana	Northern Parula	Reinita Pechidorada	3	MNN
Protonaria citrea	Prothonary Warbler	Reinita Protonotaria	3	MNN
Seiurus aurocapillus	Ovenbird	Pizpita Dorada	3	MNN
Seiurus motacilla	Louisiana Waterthrush	Pizpita de Río	3	MNN
Seiurus noveborascensis	Northern Waterthrush	Pizpita de Mangle	3	MNN
Setophaga ruticilla	American Redstart	Reinita Candelita	3	MNN
Vermivora chrysoptera	Golden-winged Warbler	Reinita Alidorada	3	MNN
Wilsonia citrina	Hooded Warbler	Reinita Viuda	3	MNN
COEREBIDAE				
Coereba flaveola	Bananaquit	Reinita Común	3	RN
THRAUPIDAE				
Euphonia musica	Blue-hooded Euphonia	Jilguero/Canario del País	3	RN
Spindalis portoricensis	Puerto Rico Stripe-headed Tanager	Reina Mora de Puerto Rico	3	RN, END
Nesospingus speculiferus	Puerto Rican Tanager	Llorosa de Puerto Rico	3	RN, END
Piranga rubra	Scarlet Tanager	Tangara Veranera	3	MNN
EMBERIZIDAE				
Ammodramus savannarum	Grasshopper Sparrow	Gorrión Chicharra	3	RN
Sicalis flaveola	Saffron Finch	Pinzón Azafrán	1	RN, IN
Tiaris bicolor	Black-faced Grassquit	Gorrión Negro	3	RN
Tiaris olivacea	Yellow-faced Grassquit	Gorrión Barba Amarilla	3	RN

continua en la siguiente página

FAMILIA/Especie	***Nombre Común en Inglés***	***Nombre Común En Español***	***D***	***Estado***
Loxigilla portoricensis	Puerto Rican Bullfinch	Comeñame	3	RN, END
CARDINALIDAE				
Passerina cyanea	Indigo Bunting	Gorrión Azul	3	MNN
ICTERIDAE				
Agelaius xanthomus	Yellow-shouldered Blackbird	Mariquita de Puerto Rico	3	RN, END, EPE
Dolichornyx oryzivorus	Bobolink	Chambergo	2	MNN
Molothrus bonariensis	Shiny Cowbird	Tordo Lustroso	3	RN, IN?
Quiscalus niger	Greater Antillean Grackle	Chango, Mozambique	3	RN
Icterus dominicensis	Black-cowled Oriole	Calandria	3	RN
Icterus galbula	Northern Oriole	Calandria del Norte	3	MNN
Icterus icterus	Troupial	Turpial	3	RN, IN
CARDUELINAE				
Carduelis cucullata	Red Siskin	Cardenalito	3	RNN?, IN
Serinus mozambicus	Yellow-fronted Canary	Canario Cantador	1	RNN?, IN
PASSERIDAE				
Passer domesticus	House Sparrow	Gorrión Doméstico	3	RN, IN
PLOCEINAE				
Euplectes afer	Yellow-crowned Bishop	Napoléon Tejedor	2	RNN?, IN
Euplectes franciscanus	Red Bishop	Obispo Colorado	3	RN, IN
ESTRILDIDAE				
Amandava amandava	Red Amandavat	Gorrión Fresa	1	RN?, IN
Estrilda melpoda	Orange-cheeked Waxbill	Veterano	3	RN, IN
Estrilda troglodytes	Black-rumped Waxbill	Veterano Orejicolorado	3	RN, IN
Lonchura cucullata	Bronze Mannikin	Diablito	3	RN, IN
Lonchura malabarica	Warbling Silverbill	Gorrión Picoplata	3	RN, IN
Lonchura malacca	Chestnut Mannikin	Monja Tricolor	3	RN, IN
Lonchura punctulata	Nutmeg Mannikin	Gorrión Canela	3	RN, IN
Vidua macroura	Pin-tailed Widah	Viuda Colicinta	3	RN, IN

continuación de la página 52

familia Estrildidae y cotorras y periquitos de la familia Psittacidae, cuyos hábitos reproducitivos son desconocidos.

La región del karso alberga 16 de las 17 especies de aves endémicas de Puerto Rico. La única que no se ha informado en la franja kárstica es la Reinita del Bosque Enano (*Dendroica angelae*). Esta especie se encuentra solo en elevaciones medias y altas de los bosques ultramáficos o de origen volcánico en las montañas de Puerto Rico. Las aves más comunes tanto en la zona caliza del Norte como en la del Sur son las especies nativas y endémicas. Éstas incluyen la Rolita, la Paloma Sabanera, el San Pedrito de Puerto Rico (*Todus mexicanus*), el Pitirre (*Tyrannus dominicensis*), el Zorzal de Patas Coloradas (*Margarops fuscatus*), el Bienteveo (*Vireo latimeri*), la Reinita Común (foto 39), el Gorrión Negro (*Tiaris bicolor*), el Mozambique (*Quiscalus niger*) y el Comeñame (*Loxigilla portoricensis*).

Se han reportado nueve especies en peligro de extinción en la región del karso; incluyendo a la Cotorra de Puerto Rico o Iguaca (*Amazona vittata*) (foto 40), la cual era extremadamente abundante en los bosques calizos del Norte y del Sur (Snyder y otros 1987). El Aviario José A. Vivaldi está localizado en el Bosque Estatal de Río Abajo en la franja kárstica y alberga cerca de 60 Iguacas. El aviario desarrolla un programa para la reproducción en cautiverio de esta especie. La Cotorra Puertorriqueña se reproduce bien en cautiverio en las condiciones del karso, lo cual sugiere que este es un hábitat favorable para el restablecimiento eventual de una segunda población silvestre. La conservación de la Cotorra Puertorriqueña tiene especial importancia ya que la mayor parte de las otras especies de *Amazona* endémicas a las Antillas están

Foto 39. Reinita (*Coereba flaveola*), una rastreadora de néctar. Foto de L. Miranda Castro.

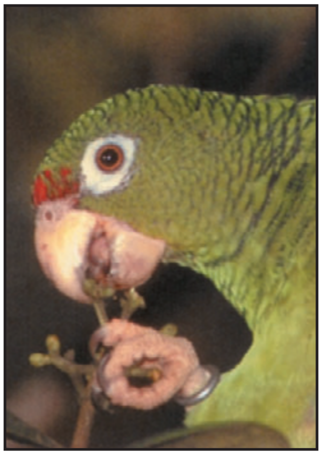

Foto 40. Cotorra Puertorriqueña (*Amazona vittata*). Foto de T. Carlo.

también en peligro de extinción (Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE.UU. 1999). Los conocimientos obtenidos en los esfuerzos de conservación de la cotorra de Puerto Rico pueden ser aplicables a los esfuerzos de conservación de las otras especies de cotorras de las Antillas, los Estados Unidos, del neotrópico e incluso del resto del mundo.

La diversidad y abundancia de la vida silvestre en la franja kárstica es el resultado de la diversidad de los ecosistemas, que proveen abundante alimento, albergue y lugares de anidaje a las especies de aves. La topografía del karso, con sus valles, cañones, cerros, sumideros, cavidades y abundantes grietas provee un hábitat muy diverso para la vida silvestre. La abundancia de especies de aves, a su vez, acelera la dispersión de las semillas y la regeneración de los arbustos y árboles cuyas flores, frutas y semillas constituyen parte de sus dietas. Esta sinergía entre la vida silvestre y la vegetación aceleró la recuperación de los bosques luego de la gran deforestación que sufrió Puerto Rico al comienzo del siglo pasado (Ricart Morales 1999, Rivera y Aide 1998).

Las aves de rapiña pertencen a un grupo prominente de aves en la franja kárstica. Por ocupar la cima de la cadena alimentaria, éstas son más vulnerables a los cambios ambientales. Dos especies de aves de rapiña, de las siete que se encuentran en Puerto Rico, están en peligro de extinción: el Guaraguao de Bosque (*Buteo platypterus*) y el Falcón de Sierra (*Accipiter striatus*) (foto 41). La población más saludable del Guaraguao de Bosque se encuentra en el Bosque Estatal de Río Abajo, donde se estima que consiste de 52 individuos (Delannoy 1992, 1997; Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE.UU. 1997a). Aunque no se han encontrado lugares de anidaje, individuos de estas dos especies de aves de rapiña han sido observadas en el sector del río Encantado de la franja kárstica, entre Ciales y Florida, al este del Bosque Estatal de Río Abajo. En el pasado, el Falcón de Sierra se encontraba ampliamente distribuido en la franja kárstica (Wetmore 1927). La alteración del hábitat, tal como la pérdida de cinco lugares de anidaje y más de 80 ha de bosque perdidas por la construcción de la carretera PR 10, han causado reducciones significativas de esta especie. El Falcón Común (*Falco sparverius*) y el Múcaro de Puerto Rico (*Otus nudipes*) probablemente son las aves de rapiña más comunes en la franja kárstica (foto 42). Se alimentan de pequeños reptiles, insectos grandes y mamíferos como ratones y murciélagos (Wetmore 1916, 1927).

Las aves de rapiña migratorias, tal como el Falcón Peregrino (*Falco peregrinus*), se encuentran en el karso entre los meses de octubre y abril. El Falcón Peregrino es particularmente abundante a lo largo de la costa y de los ríos como el río Grande de Manatí y el río Grande de Arecibo. Allí, las extensas áreas abiertas le permiten al Falcón volar sin impedimentos para capturar su presa. El Falcón Migratorio o Merlin (*Falco columbarius*) también visita la Isla entre los meses de octubre y abril (Raffaele 1992, Biaggi 1997). Esta especie es más común en la costa sur, pero también se encuentra en la zona caliza del Norte.

Miles de aves migratorias del neotrópico, que representan más de 40 especies de aves terrestres y 45 especies de aves costeras y marinas, visitan anualmente la franja kárstica (Raffaele 1992, tabla 12). La mayoría de las aves terrestres son reinitas de bosque que vienen desde tan lejos como Canadá y Alaska por el corredor de vuelo del Atlántico, pero se han avistado e informado especies migratorias de Eurasia (foto 43). La dieta de estas aves migratorias coincide considerablemente con la dieta de las especies residentes, que consta mayormente de insectos, pero a veces también consumen grandes cantidades de frutas y semillas.

Otro grupo de aves de importancia en la región del karso son los insectívoros, que incluyen especies endémicas como el Guabairo

Foto 41. Falcón de Sierra (*Accipiter striatus*). Foto de C. Delannoy.

Foto 42. Múcaro de Puerto Rico (*Otus nudipes*), una especie endémica. Foto de L. Miranda Castro.

Foto 43. Reinita Pechidorada (*Parula americana*), una especie migratoria. Foto de J. Colón.

Foto 44. San Pedrito de Puerto Rico (*Todus mexicanus*), un endémico. Foto de L. Miranda Castro.

de Puerto Rico (*Caprimulgus noctitherus*), el San Pedrito, el Carpintero de Puerto Rico (*Melanerpes portoricensis*) y el Bienteveo. También en este grupo están otras especies nativas como el Pitirre y la Reinita Mariposera (*Dendroica adelaidae*). Estas aves son comunes y están distribuidas tanto en la caliza del Norte como en la del Sur (Hernández Prieto 1993), y prefieren la vegetación tupida de las cimas de los mogotes. El San Pedrito de Puerto Rico es una de las especies más abundantes, tanto en la zona caliza del Sur, que es árida, como en la zona caliza del Norte, que es húmeda (foto 44). Es un ave que anida en los taludes de tierra, y usualmente excava sus nidos en las riberas de los ríos, los derrumbes, los cortes de carreteras y las entradas de las cavidades. De particular interés resulta el Guabairo, una especie endémica que antes estuvo distribuida tanto en la zona caliza del Norte como la del Sur, y que ahora sólo se encuentra en fragmentos de bosque seco en la zona caliza del Sur. El Carpintero de Puerto Rico tiene una amplia distribución. Su dieta es amplia e incluye frutas de varias especies, invertebrados que se encuentran en madera muerta aún de pie, ganchos de árboles, y coquíes y lagartijos que se encuentran en las bromeliáceas y otras epífitas.

Las aves nectívoras se alimentan del néctar, pero dependen principalmente de otras fuentes de alimento tales como artrópodos, en particular durante la época de reproducción cuando su necesidad metabólica de proteínas aumenta. La

Foto 45. Zumbadorcito de Puerto Rico (*Chlorostilbon maugeaus*), un endémico. Foto de L. Miranda Castro.

familia de los zumbadores (Trochilidae) es endémica a Norte y Sur América y es un buen ejemplo de este tipo de alimentación. Las cinco especies residentes de zumbadores, que incluyen dos endémicas, se encuentran en la franja kárstica. El Zumbadorcito de Puerto Rico (*Chlorostilbon maugaeus*) es muy común, y anida en el sotobosque como a dos metros sobre el suelo (foto 45). El otro endémico, el Zumbador Verde de Puerto Rico (*Anthracothorax viridis*), es menos común que su congénere el Zumbador Dorado (*A. dominicus*). El Zumbador Dorado es más común en lugares más secos y suele anidar a 7 m sobre el suelo. El Zumbador Pechirojo (*Archilocus colubris*) se ha observado en Arecibo y Guánica, mientras que el Zumbador Pechi-púrpura, posiblemente el Pechi-púrpura del Caribe (*Eulampis jugularis*) ha sido fotografiado en Guánica y grabado en vídeo en Ciales. En 1998, el paso del huracán Georges causó la destrucción de las fuentes de néctar en la mayor parte de los bosques, causando que una gran cantidad de aves nectívoras pasaran hambre. Sin embargo, muchos rodales de

Foto 46. Las frutas del moral (*Cordia sulcata*) son una fuente importante de alimentación para las aves del bosque del karso. Foto de L. Miranda Castro.

bosque en los valles protegidos de la franja kárstica no fueron afectados por el huracán y se convirtieron en refugio para estas aves.

Las aves frugívoras representan otra comunidad en la franja kárstica, la más diversa y abundante, e incluye a las palomas y perdices (Colombiformes), cotorras (Psittaciformes) y una gran diversidad de aves cantoras (Passeriformes). Las aves cantoras endémicas incluyen el Comeñame, la Reina Mora (*Spindalis portoricensis*) y la Llorosa (*Nesospingus speculiferus*), que constituye el único género endémico de la Isla. Estas aves cantoras suelen alimentarse de frutas y semillas de especies como el moral (*Cordia sulcata*) (foto 46), el yagrumo macho (*Shefflera morototoni*), el yagrumo hembra (*Cecropia schreberiana*), el cupey, y el guaraguao (*Guarea guidonia*). Algunas aves frugívoras son muy especializadas en su dieta. Por ejemplo, el Hilguero (*Euphonia musica*) se alimenta mayormente del muérdago y otras epífitas parasíticas (Loranthaceae y Viscaceae) que son comunes en los valles protegidos donde estas especies se congregaron luego del huracán Georges. El Zorzal de Patas Coloradas y la Paloma Turca (*Columba squamosa*) se encontraron con mayor frecuencia en los bosques del karso que en los de substrato volcánico (Rivera Milán 1993).

Carlo Joglar (1999) encontró preferencias significativas en la dieta de nueve frugívoros comunes. El ochenta por ciento de sus observaciones fueron hechas en un 17.6 por ciento de las especies frugívoras disponibles. El tamaño del ave se asoció significativamente a las diferencias en los patrones de alimentación: las aves de mayor tamaño consumen frutas más grandes y tienen dietas similares. Todas las especies de aves mostraron preferencias locales por alguna planta con frutas. Los bosques del karso mostraron densidades más bajas de frutas que los cafetales bajo sombra y los bosques húmedos fuera de la franja kárstica.

Mamíferos

Los murciélagos son los únicos mamíferos nativos existentes en Puerto Rico

Foto 47. Los murciélagos son los únicos mamíferos autóctonos que quedan en Puerto Rico, éstos abundan en la franja kárstica. Foto de A. Puente Rolón.

(foto 47). Son muy comunes en las cavidades de la franja kárstica. Los restos fósiles de la franja kárstica indican que 16 especies de murciélagos y 5 géneros de mamíferos terrestres estuvieron presentes en la Isla. Todas las otras especies de mamíferos terrestres están extintas. Las 13 especies existentes de murciélagos en Puerto Rico se distribuyen en cinco familias. Aproximadamente la mitad de estas especies y cuatro géneros, *Monophyllus, Erophylla, Stenoderma* y *Brachyphylla*, son endémicos de las Antillas.

La franja kárstica alberga las 13 especies de murciélagos conocidas en la Isla, 10 de las cuales prefieren las cavidades como albergue (Rodríguez Durán 1998). Entre estas especies están los murciélagos frugívoros y nectívoros. Los murciélagos frugívoros dispersan millones de semillas, algunas de las cuales resultan muy grandes para ser acarreadas por cualquier otro animal de Puerto Rico. Los murciélogos nectívoros polinizan las flores de noche. El rápido restablecimiento de los bosques en tierras agrícolas abandonadas en la franja kárstica, y a través de Puerto Rico, se ha debido en parte a la dispersión de semillas y polinización de flores por los murciélagos.

Una especie que captura la imaginación es el Murciélago Pescador (*Noctilio leporinus*). Este murciélago no se zambulle en el agua, sino que atrapa los peces que están cerca de la superficie. Es el más grande y majestuoso de todas las especies de murciélagos que se encuentran en la Isla. Sin embargo, los efectos mayores de los murciélagos en los ecosistemas son producidos por los murciélagos que comen insectos. Una sola colonia de estos murciélagos pequeños puede consumir sobre 20 toneladas de insectos cada mes (Rodríguez Durán y Lewis 1987). Esta tasa de consumo de insectos es beneficiosa para la agricultura y para los humanos, por su rol en el control de plagas.

Sólo una tercera parte de las cavidades en Puerto Rico albergan murciélagos. Dos hipótesis pueden explicar esta observación: que la mayor parte de las cavidades no cumplen con los requisitos biológicos de los murciélagos, o que las asociaciones de varias especies en un mismo albergue son necesarias. Las dos hipótesis no son mutuamente excluyentes, porque una ventaja de las congregaciones multiespecíficas es que pueden producir modificaciones al microclima de la cavidad. Las diferencias microclimáticas en el albergue causadas por una variedad de microestructuras, tales como las estalactitas y las cavidades resultantes de disoluciones, pueden a su vez contribuir a los patrones de asociación de los murciélagos (Rodríguez Durán 1998).

En Puerto Rico, las cavidades calientes son utilizadas todo el año por varias especies de murciélagos. Las cavidades calientes tienen las siguientes características: una sola entrada de tamaño reducido con mínima circulación de aire, una alta densidad de murciélagos, aire con temperaturas que fluctúan entre 28º C a 40º C y una humedad relativa que excede el 90 por ciento. Cerca de un 11 por ciento de todas las cavidades utilizadas por los murciélagos son calientes y se encuentran mayormente en la franja kárstica.

Los murciélagos de las Antillas que usan cavidades calientes exhiben un alto grado de gregarismo y gran fidelidad al albergue. Por lo menos una especie - quizás dos - existe exclusivamente en este tipo de cavidades y por lo menos cinco especies dependen exclusivamente de las cavidades calientes para su reproducción. A pesar de que en Puerto Rico hasta siete especies diferentes pueden ocupar una misma cavidad, las diferentes especies mantienen una separación espacial dentro de la misma. Se ha sugerido que la competencia interespecífica regula los tamaños de las poblaciones en estas cavidades. Cuando varias especies ocupan la misma cavidad, ellas compiten entre sí por los lugares de albergue y el acceso a la entrada. Las entradas estrechas de las cavidades pueden físicamente restringir el flujo de los murciélagos durante los periodos de mayor actividad y limitar el número de murciélagos en la cavidad. Por ejemplo, en la cavidad Cucaracha en el oeste de Puerto Rico, tres especies de murciélagos con una población total de 700,000 individuos comparten una cavidad caliente con una apertura de 1.5 m^2.

Muchas especies de murciélagos que habitan cavidades calientes son propensas a la deshidratación. Estas especies pueden formar grupos grandes, por los beneficios que derivan de un ambiente termoneutral - un ambiente con una temperatura en la cual el gasto energético es mínimo - y la humedad elevada de estos albergues reduce la deshidratación. Además, el desarrollo de colonias grandes puede aumentar el éxito de la colonia para alimentarse, al funcionar como centros informativos, además del éxito reproductivo, al reducir la exposición de los recién nacidos a la depredación y efectos del clima. Estos beneficios se contraponen a los costos asociados con el uso permanente de las cavidades. Por ejemplo, un número grande de murciélagos atraerá concentraciones de depredadores a la entrada de la cavidad (Rodríguez Durán y Lewis 1985, Rodríguez Durán 1996).

Las diferencias interespecíficas en patrones alimentarios y el regimen alimentario, producen diferencias entre las horas de salida de la cavidad. Estas diferencias permiten que un mayor número de cuerpos mantengan la temperatura de la cavidad, en comparación con una colonia de una sola especie o un conglomerado aleatorio de especies, en los cuales podrían coincidir los momentos pico de salida de la cavidad. Las colonias de multiespecies de murciélagos que habitan las cavidades presentan oportunidades para estudiar muchos patrones de comportamiento, y la importancia de estas asociaciones grandes en términos del flujo de energía en el ecosistema es probablemente única.

Las historias míticas que con frecuencia se relacionan

con los murciélagos han resultado en una imagen pobre y poco merecida. Sin embargo, las investigaciones ecológicas en la franja kárstica están proveyendo información que nos permite apreciar el papel positivo que estos magníficos animales tienen en el funcionamiento de los ecosistemas terrestres.

Especies Endémicas y en Peligro de Extinción[7]

El grado de endemismo de los árboles en la franja kárstica es de 16 y 23 por ciento del total para la Isla en los bosques húmedos y muy húmedos, respectivamente (Figueroa Colón 1995). Para las especies de aves, el grado de endemismo es de 7 por ciento para las zonas calizas del Norte y del Sur. La fauna de las cavidades merece especial atención en esta sección principalmente porque se sabe tan poco sobre ella. Culver y otros (1999) produjeron una lista de especies y subespecies residentes en las cavidades de los Estados Unidos continentales; y enumeraron 927 especies, 46 subespecies adicionales y 96 familias. La lista mostró un alto nivel de endemismo, con 54 por ciento de las especies conocidas oriundas de un sólo país. Menos del 4 por ciento estaban listadas conforme a la Ley de Especies en Peligro de Extinción. Las cavidades de Puerto Rico no han sido

Tabla 13. Plantas y animales que habitan las zonas calizas del norte y del sur y que están considerados vulnerables o en peligro de extinción por agencias locales y federales. Se indica el nombre común si se ha podido identificar uno y a falta de un nombre común, se indica un nombre descriptivo (helecho, arbusto). El estado de la especie se clasifica en peligro de extinción (PE) o vulnerable (V) y los niveles de gobierno se clasifican en estatal (E) o federal (F).

FAMILIA/especie	***Nombre Común***	***Estado***
	PLANTAS	
ADIANTACEAE		
Adiantum vivesii	helecho	PE (E, F)
ARECACEAE		
Calyptronoma rivaris	palma de manaca	PE (E)
ASPLENIACEAE		
Tectaria estremerana	helecho	PE (E, F)
BORAGINACEAE		
Cordia bellonis	arbusto	PE (E, F)
BUXACEAE		
Buxus vahlii	diablito de tres cuernos	PE (E, F)
CACTACEAE		
Harrisia portoricensis	higo chumbo	V (E, F)
CANELLACEAE		
Phloeodendron macranthum	chupacallos	PE (E)
FABACEAE		
Cassia mirabilis	arbusto	PE (E, F)
Chamaecrista grandulosa var. mirabilis	arbusto. Se entiende que es en efecto la misma especie que la anterior.	PE (E, F)
Stahlia monosperma	cóbana negra	PE (E)
FLACOURTIACEAE		
Banara vanderbiltii	palo de ramón	PE (E)
ICACINACEAE		
Ottoschulzia rhodoxylon	palo de rosa	PE (E, F)
MELIACEAE		
Trichilia triacantha	bariaco	PE (E, F)
MYRTACEAE		
Myrcia paganii	arbusto florido	PE (E)
OLACACEAE		
Schoepfia arenaria	arbusto	PE (E, F)
PIPERACEAE		
Peperomia wheeleri	planta herbácea; peperomia de Wheeler	PE (E, F)
RHAMNACEAE		
Auerodendron paucifolium	arbusto	PE (E, F)
RUBIACEAE		
Catesbaea melanocarpa	arbusto	V (E)
RUTACEAE		
Zanthoxylum thomasianum	árbol	PE (E, F)
SOLANACEAE		
Goetzea elegans	matabuey	PE (E)
Solanum drymophylum	erubia	PE (E)
THELYPTERIDACEAE		
Thelypteris verecunda	helecho	PE (E, F)
THYMELAEACEAE		
Daphnosis helleriana	árbol bajo	PE (E)
VERBENACEAE		
Cornutia obovata	palo de nigua	PE (E)
	ANIMALES	
BUFONIDAE		
Peltophryne lemur	Sapo Concho de Puerto Rico	PE (E, F)

continua en la siguiente página

[7] Nos concentramos en las especies enumeradas en la Ley Federal de Especies en Peligro de Extinción, aunque la tabla 13 detalla además las especies enumeradas como especies en peligro por el gobierno del Estado Libre Asociado de Puerto Rico.

Tabla 13. *continuación de la página anterior*

FAMILIA/especie	*Nombre Común*	*Estado*
DERMOCHELIDAE		
Dermochelys coriacea	Tinglar	PE (E, F)
CHELONIDAE		
Chelonia mydas	Tortuga Verde	PE(E, F)
Eretmochelys imbricata	Carey de Concha	PE (E, F)
POLYCHROTIDAE		
Anolis cooki	Lagartijo del Bosque Seco	V (E)
SCINCIDAE		
Mabuya mabuya sloani	Lucía o Santa Lucía	V (E)
BOIDAE		
Epicrates inornatus	Boa Puertorriqueña	PE (E, F)
PELECANIDAE		
Pelecanus occidentalis	Pelícano Pardo	PE (E, F)
PODICIPEDIDAE		
Tachybaptus dominicus	Tigua	V (E)
ANATIDAE		
Dendrocygna arborea	Chiriría Caribeña	V (E)
Oxyura dominica	Pato Dominico	V (E)
Oxyura jamaicensis	Pato Chorizo	V (E)
ACCIPITRIDAE		
Accipiterstriatus venator	Falcón de Sierra	PE (E, F)
Buteo platypterus brunnescens	Guaraguao de Bosque	PE (E, F)
RALLIDAE		
Fulica caribaea	Gallinazo Caribeño	V (E)
Porzana flaviventer	Gallito Amarillo	V (E)
CHARADRIIDAE		
Charadrius alexandrinus	Chorlo Blanco	V (E)
Charadrius melodus	Chorlo Melódico	V (E, F)
LARIDAE		
Sterna antillarum	Charrán Pequeño	PE (E, F)
Sterna dougallii	Palometa, Charrán Rosado	V (E, F)
COLUMBIDAE		
Columba inornata wetmorei	Paloma Sabanera	PE (E, F)
PSITTACIDAE		
Amazona vittata	Cotorra Puertorriqueña	PE (E, F)
CAPRIMULGIDAE		
Caprimulgus noctitherus	Guabairo de Puerto Rico	PE (E, F)
CORVIDAE		
Corvus leucognaphalus	Cuervo Pescueciblanco	PE (E, F)
ICTERIDAE		
Agelaius xanthomus	Mariquita de Puerto Rico	PE (E, F)
TRICHECHIDAE		
Trichechus manatus manatus	Manatí Antillano	PE (E, F)

estudiadas en detalle y probablemente tienen muchas especies endémicas y en peligro de extinción que ni siquiera han sido catalogadas. Para los invertebrados nada más, Peck (1974) informó un 29 por ciento de endemismo. El recuadro 1 resume el nivel de especies en la Isla de Mona.

La región del karso alberga poblaciones de más de 30 especies que se conoce están amenazadas o en peligro de extinción (tabla 13). La mayor parte de las especies en peligro de extinción presentes en la franja kárstica son plantas con una distribución restringida que las hace vulnerables a la alteración del hábitat y a la destrucción por prácticas inadecuadas de uso de terrenos.

Flora

El chupacallos (*Pleodendron macranthum*) es un árbol en peligro de extinción que existe sólo en la Sierra de Luquillo y en los bosques kársticos del Norte de Puerto Rico. Es un árbol siempreverde aromático que puede llegar hasta 10 m de alto y produce una madera muy dura (Little y otros 1974). Al presente se

Foto 48. Mata buey (*Goetzea elegans*), especie endémica y en peligro. Foto de E. Santiago.

encuentra en peligro de extinción debido a la alteración y destrucción de su hábitat por la deforestación para usos agrícolas y urbanos y el pobre manejo forestal (Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE.UU. 1997b).

Las especies *Myrcia paganii* y *Auerodendron pauciflorum* son árboles siempreverdes pequeños que sólo existen en la humedad de la franja kárstica. Su estado como especies en peligro de extinción se debe a su rareza y su distribución restringida, como resultado de desarrollos rurales, urbanos y agrícolas. *Auerodendron pauciflorum* está restringida a una población de 19 individuos en los acantilados del karso en Isabela. Una segunda población que se encontraba en el Bosque Estatal de Río Abajo fue destruida por la construcción de la carretera PR 10 (Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE.UU. 1996a).

El matabuey (*Goetzea elegans*) es un pequeño árbol endémico y siempreverde del bosque kárstico del norte (foto 48). Sobreviven aproximadamente 50

individuos en tres poblaciones diferentes. Uno de los problemas más serios para esta especie es la sobrecolección para fines científicos y ornamentales. La población mayor de esta especie se encuentra en la quebrada Bellaca en Quebradillas. Todas, menos una de las poblaciones conocidas en el área de Guajataca/Quebradillas, han sido extirpadas desde su descubrimiento. Las poblaciones restantes de mata buey están en peligro debido a la construcción de carreteras que atraviesan la franja kárstica (Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE.UU. 1987a).

La especie *Chamaecrista glandulosa var. mirabilis* es un arbusto pequeño restringido a las arenas blancas silíceas de la zona caliza del Norte. La especie está dispersa a lo largo de la costa sur de la laguna Tortuguero y en una localidad en Dorado y otra en Vega Alta. Las expansiones urbanas, industriales y agrícolas, así como la extracción de arena pueden haber eliminado las otras poblaciones. Aunque son muy pocas las áreas de arenas silíceas que no se han explorado, es posible que aún existan otras poblaciones (Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE.UU. 1994a). El área que comprende el caño Tiburones es rica en depósitos de arenas silíceas y aún no ha sido explorada para identificar esta especie.

Foto 49. Palma de manaca (*Calyptronoma rivalis*), especie endémica. Foto de A. Puente Rolón.

La palma de manaca (*Calyptronoma rivalis*) se ha designado como amenazada (foto 49). Se conocen sólo tres poblaciones de esta palma endémica y consisten en aproximadamente 275 individuos en la caliza del Norte. Estas poblaciones naturales se encuentran en San Sebastián a lo largo del río Camuy y el río Guajataca. Dos nuevas poblaciones han sido restablecidas en el Bosque de Río Abajo y cerca del embalse de Guajataca. Las poblaciones de palma de manaca declinaron debido a la deforestación para la agricultura, el pastoreo, la producción de carbón y la expansión urbana. La eliminación del hábitat por la extracción de roca caliza para la construcción constituye una seria amenaza a estas poblaciones. Una gran parte de la población de palma de manaca a lo largo del río Camuy fue destruida durante la construcción de una carretera en el área; y una parte importante de la población restante puede verse afectada por las inundaciones resultantes de la deforestación de áreas circundantes (Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE.UU. 1992a).

El diablito de tres cuernos, *Buxus vahlii*, es un pequeño árbol endémico y siempreverde de Puerto Rico. Se desconocen las razones de su rareza, pero se atribuye a la extensa deforestación y desarrollo urbano en los valles de la Isla. Esta especie está restringida a dos poblaciones, una en Rincón y una en el barrio de Hato Tejas, Bayamón. Es posible que se encuentren poblaciones adicionales de esta especie en búsquedas más sistemáticas de la zona caliza del Norte (Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE.UU. 1987b).

El palo de ramón (*Banara vanderlbiltii*) es un árbol siempreverde en peligro de extinción que se encuentra en la franja kárstica. Los factores limitantes de su distribución han sido la deforestación, cortas selectivas para la agricultura, el pastoreo, la producción de carbón y materiales de construcción. Hoy en día, la amenaza más fuerte es la expansión urbana e industrial que irrumpe en el karso, por ejemplo, el caso de la población del río Lajas al oeste de Bayamón. El cultivo de ñames causó la destrucción de dos individuos adultos y la población está amenazada por un vertedero abandonado localizado en el área y una servidumbre de paso del tendido eléctrico cercana (Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE.UU. 1991a).

Tres helechos en peligro de extinción se encuentran en la franja kárstica: *Adiatum vivesii*, *Tectaria estremerana* y *Thelypteris verecunda*. Estos helechos tienen una distribución restringida y vulnerable a la modificación y destrucción del hábitat. De *Thelypteris verecunda* y *A. vivesii* se conoce sólo una población de cada una. Una población de *T. estremerana* (23 individuos) está localizada 200 m al sur del radio telescopio de Arecibo. Esta especie también ha sido reportada para el Bosque Estatal de Río Abajo. Las prácticas de manejo forestal y el desarrollo de estructuras para un radio telescopio podrían afectar adversamente a esta especie (Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE.UU. 1996b).

El bariaco (*Trichilia triacantha*) es un árbol endémico de Puerto Rico que se encuentra en peligro de extinción. Se encuentra sólo en dos lugares de la caliza del Sur, donde existen cerca de 40 individuos. Los factores más importantes que han limitado la distribución de la especie han sido la deforestación, la corta selectiva para proyectos urbanos e industriales, la agricultura, la producción de carbón y las cortas para postes de verjas. Al presente, los proyectos residenciales e industriales, así como el mal manejo forestal, amenazan la especie (Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE.UU. 1991b).

El palo de rosa (*Ottoschulzia rhodoxylon*) es un árbol siempreverde, que puede llegar a medir hasta 15 m de altura y tener hasta 41 cm de diámetro. Es endémico de Puerto Rico y La Española, donde es raro. Se conocen cerca de 191 individuos en las 13 poblaciones en la Isla. Esta especie fue utilizada intensamente para producir postes y por su valiosa madera de color rojizo. Estos factores, junto a la deforestación, redujeron marcadamente las poblaciones de palo de rosa. Los estudios sobre la ecología de esta especie comenzaron en el 1991 y aún continúan. Como resultado, se han

Foto 50. Guabairo de Puerto Rico (*Caprimulgus noctitherus*). Foto de J. Colón.

descubierto nuevas poblaciones en la zona caliza del Norte, se han descrito las flores y se han iniciado estudios de germinación (Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE.UU. 1994b).

Fauna

El Sapo Concho es el único bufo nativo de Puerto Rico. Esta especie aparentemente se encuentra extinta en Virgen Gorda y en las otras Islas Vírgenes Británicas; convirtiendo a Puerto Rico en el único lugar donde sobrevive esta especie. Su reproducción es esporádica y altamente dependiente de aguaceros ocasionales e intensos, pero de corta duración. Los sapos normalmente cavan un metro o más en el suelo y salen a aparearse cuando los suelos se saturan luego de intensos aguaceros, que pueden acumular por lo menos 5 cm de agua en charcas temporales. La alteración o destrucción de ciertas charcas de apareamiento puede resultar en la eliminación de una población de esta especie en peligro de extinción. Sólo dos charcas han sido identificadas como criaderos del Sapo Concho en el Bosque Estatal de Guánica. En el pasado, los criaderos fueron eliminados al ser rellenados para la construcción, la agricultura o como medida de control de mosquitos. La sobrecolección de la especie puede también haber resultado en la eliminación de ciertas poblaciones. Las únicas poblaciones conocidas de esta especie se encuentran en el Bosque Estatal de Guánica en la zona caliza del Sur y en Quebradillas en la caliza del Norte (Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE.UU. 1992b).

La Boa Puertorriqueña es la culebra nativa de mayor tamaño en la Isla. Esta especie está distribuida en toda la Isla, pero es más común en la franja kárstica. Los datos históricos tienden a señalar una baja en los números poblacionales de la Boa, pero estos datos son escasos.

El Guabairo (foto 50) es un ave nocturna que está principalmente restringida a los bosques calizos del Sur (Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE.UU. 1984). También se encuentra en el Bosque Estatal de Susúa, que es un bosque húmedo de suelos de serpentina (ultramáficos) donde la v vegetación es similar en fisonomía a la del bosque seco calizo. En el pasado, esta especie estuvo distribuida en casi todos los bosques kársticos de la Isla (Wetmore 1916). Aunque la pérdida de hábitat es la causa principal por la cual el Guabairo se encuentra en peligro de extinción, la mangosta (*Herpestes auropunctatus*), un mamífero introducido, se considera como una de las mayores amenazas para la especie.

La Mariquita (*Agelaius xanthomus*) es una especie endémica de Puerto Rico, en peligro de extinción. Hay dos subespecies reconocidas: *A. x. xanthomus* y *A. x. monensis*. La primera se encuentra en la isla de Puerto Rico y la segunda se encuentra en la Isla de Mona. Esta especie era abundante en San Juan (Taylor 1964) y estaba distribuida por todo Puerto Rico (Wetmore 1916, Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE.UU. 1996c). La especie está en peligro de extinción debido a la alteración y destrucción de su hábitat, la depredación por mamíferos introducidos y al parasitismo del Tordo Lustroso, Molothrus bonariensis (Post y Wiley 1976, Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE.UU. 1996c).

El Guaraguao de Bosque (*Buteo platypterus brunnescens*) es una subespecie endémica de ave de rapiña de Puerto Rico. Está muy amenazada por la fragmentación y la desaparición de las áreas boscosas. Quedan muy pocos individuos, principalmente en las reservas forestales de bosque montano de Luquillo, Carite y Río Abajo en el interior de la Isla (Pérez Rivera y Cotte Santana 1977, Snyder y otros 1987, Raffaele 1992, Delannoy 1992).

En Puerto Rico, el Guaraguao de Bosque coexiste con el Guaraguao Colirrojo (*Buteo jamaicensis*). El Guaraguao de Bosque se diferencia por tener rayas negras y blancas horizontales en la cola, ser más pequeño y preferir como hábitat los bosques densos (Raffaele 1992). El Guaraguao Colirrojo se puede observar comúnmente sobrevolando los bosques del centro de la isla y las planicies costaneras. Los colirrojos aprovechan las cálidas corrientes de aire para planear y mantenerse en vuelo, mientras buscan su presa. El Guaraguao de Bosque vigila y espera silenciosamente su presa en las ramas de los árboles. Sin embargo, también es posible observarlo sobre el dosel del bosque en pleno vuelo de cortejo durante la temporada de apareamiento.

El Guaraguao de Bosque se considera una especie rara en Puerto Rico desde las últimas décadas del 1800. Varios ornitólogos que estudiaron la avifauna de la Isla entre 1902 y 1935 no reportaron su existencia, por lo cual se creía que la especie estaba extinta (Bowdish 1902, 1903; Wetmore 1916, 1927; Struthers 1923; Danforth 1931). En 1935, la especie fue redescubierta en las montañas de Luquillo (Danforth y Smyth 1935). Los primeros nidos se encontraron en Luquillo en 1976 (Snyder y otros 1987), donde la especie fue observada principalmente en la parte este cerca del Pico de El Yunque (American Ornithologist's Union 1976, Snyder y otros 1987). Los polluelos eran alimentados

con ciempiés, coquíes, lagartijos, ratas y aves. La población de guaraguaos de Carite no fue informada hasta el 1980 (Hernández Prieto 1980).

El primer censo poblacional de esta ave en la isla (Delannoy 1992) reveló que habían 124 individuos en tres poblaciones (Luquillo, 22; Carite, 50; Río Abajo, 52). Luego de estos hallazgos, se llevó a cabo un estudio de los hábitos de anidaje de la especie en Río Abajo desde el 1993 hasta el 1994. El hábitat de nueve parejas fue descrito de acuerdo a las condiciones alrededor del árbol de anidaje y a las características estructurales del tipo de bosque (si era una plantación o un bosque secundario) (Tossas 1995). El Guaraguao de Bosque escoge sus lugares de anidaje de acuerdo a la fisonomía de la vegetación y no al tipo de bosque.

Los nidos del Guaraguao de Bosque se encontraban en árboles con una altura promedio de 23 m y un diámetro de 55 cm. Los árboles circundantes en el hábitat de anidaje tenían una altura promedio de 16 m. Los Guaraguaos escogían para anidar árboles más altos que el dosel del bosque y con diámetro y copa grandes. Estas características les permitían mejorar la vigilancia de sus territorios y tener mejor acceso a los nidos. Las áreas de anidaje del Guaraguao de Bosque eran valles delimitados por mogotes. Los lugares de anidaje eran defendidos agresivamente contra otros miembros de la misma especie, lo resulta en el uso de territorios separados con poco o ningún solapamiento. Los territorios promediaban 41 ha y la distancia promedio al vecino más cercano era de 714 m (Tossas 1995).

Desde el 11 de octubre del 1994, el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los EE.UU. incluyó a esta especie en la Lista de Especies en Peligro de Extinción. Sin embargo, el Guaraguao de Bosque aún confronta serios problemas por las continuas amenazas a su hábitat, como las presiones de uso a los bosques y sus áreas adyacentes en la franja kárstica. Su principal amenaza es la destrucción de hábitat por causa del desparramamiento urbano y la construcción de carreteras.

El Guabairo, la Paloma Sabanera (*Columba inornata wetmorei*) y la Cotorra Puertorriqueña (*Amazona vittata*) son especies en peligro de extinción que fueron comunes en la franja kárstica. El Carrao (*Aramus guarauna*) y el Cuervo (*Corvus leucognaphalus*) también fueron comunes en el karso pero al presente se consideran extirpados. Estos eventos son producto de los usos que se dieron a los terrenos en el pasado. Al presente, las condiciones son distintas y la franja kárstica es el hábitat ideal para restablecer estas especies. En muchos lugares, la presencia humana ha disminuido y ha sido sustituida por un hábitat abundante en recursos alimentarios y con poca presión de depredadores. En todas las Américas, la amenaza principal a las aves es la alteración y destrucción del hábitat del cual dependen (Wege y Long 1995). La presencia de grandes extensiones de bosque sin fragmentar reduce el riesgo de invasión por especies forasteras y reduce la interacción entre especies forasteras y especies en peligro de extinción. Además, la diversidad de los rasgos y la topografía del karso ofrecen amplia protección contra eventos naturales, tales como huracanes, porque tanto durante como después de las tormentas estos lugares protegidos sirven de refugio para los animales con dietas muy especializadas.

La Franja Kárstica Tiene Importancia Económica

La actividad económica de la región caliza del Norte es muy variada y abarca abastos de agua, minería, agricultura, construcción y manufactura (recuadro 12).

continua en la página 67

Recuadro 12. Industrias ubicadas en los municipios de la caliza del norte. Partes de algunos de los municipios pueden quedar fuera de la zona caliza.

La región caliza del norte sostiene el sector industrial más grande de Puerto Rico. Como se indica en la lista a continuación, hay más de 200 empresas en la región (Oficina de Investigación Económica 1996). Las instalaciones de manufactura más comunes en la región son las de alimentos, textiles, productos agrícolas, madera, papel, vidrio, metal, productos químicos y construcción. Entre éstos, las industrias farmacéuticas y tecnológicas constituyen los sectores de mayor importancia económica. Empresas tales como Pfizer Pharmaceuticals, Abbot Chemical and Health Products, Bristol-Myers Squibb, Pharmacia & Upjohn, Merck Sharp & Dohme y Du Pont exportan sus productos a los mercados de Estados Unidos. La mayoría de estas empresas manufactureras dependen del agua de alta calidad que proviene del acuífero de la costa norte (Cortés Burgos 1990).

Aguadilla
Aguadilla Shoe Corp.
Atlantic Telecom Inc.
Avon Mirabella Inc.
Brewster Hasting Corp.
Café Sanders
Cemi Muebles Inc.
Disposable Safety Wear Inc.
DSC of Puerto Rico Inc.
Elaboración Felo
Erie Scientific Co. of Puerto Rico
Faulding Puerto Rico Inc.
Flexible Packaging Co.
Fogel Caribbean Corp.
Hwelett-Packard Puerto Rico Co.
Lifestyle Footwear Corp.
Mo-Ka Shoe Co.
Namic Caribe Inc.
PR Safety
Phoenix Cable Ltd. Inc.
Polyagro Plastics Inc.
Productos La Aguadillana Inc.
Tradewinds Caribbean Air Services
West Electronic Industry Co.
Western Aviation Services Corp.

Arecibo
Altistra Unimark Inc.
American Internacional Comercial Inc.
American Metal & Electrical Equipment
Arecibo Die Cast Inc.
Arecibo Lingerie Inc.
Battery Recycling Co. Inc. (The)
Best Foods Caribbean Inc.

continua en la página siguiente

Candy Rosado Fashion Design
Caribe Carton & Partición Specialties Inc.
Caribe General Electric Products Inc.
Cutler-Hammer de PR Inc.
Dulcería Arecibeña Inc.
Dulces Taínos Inc.
Dynacast PR Inc.
Ganaderos Alvarado Inc.
Global Fibers Inc.
Homeline Furniture Mfg. Co.
Jugos Alneed
Kayser Roth Corp.
Las Mesetas Mini Factory
Living Design Furniture Mfg. Inc.
M/A-Com Inc. PR Operation
Merch Sharp & Dohme
Miramar Architectural Products Mfg. Inc.
Pastelería Los Cidrines
Performance Manufacturing Operations Inc.
Pharmacia & UpJohn
Resident Mfg. (C.A.R.A.)
Safetech Inc.
Sharellee Mfg. Inc.
Smart Modular Technologies (PR) Inc.
Superior Ind. Internacional P.R. Inc.
Systems Bio Industries Inc.
Thermo King of Puerto Rico Inc.

Barceloneta
Abbott Chemicals Inc.
Abbott Health Products Inc.
Agro-Ochoa Inc.
Bristol-Myers Squibb Co.
Frito Lay Snack Caribbean
General Instruments (P.R.) Inc.
Merck Sharp & Dohme
Nycomed P.R. Inc.
Ochoa Poultry Farm Inc.
Pfizer Pharmaceutical Inc.
Playtex Barcelonesa Corp.
Technofiber Inc.

Camuy
Ebanistería Rosa
Empresas Cruz Inc.
Hanes Menswear Inc.
Pan-Am Shoe Co. Inc.

Ciales
Artesanía en Muebles La Cialeña
Ciales Div. Of Cf. Hathaway
Jack Packaging Inc.
Thermo King Caribbean Inc.
Thermosol de Puerto Rico Inc.

Corozal
Cape Red Textile Inc.
Corozal Industries Inc.
Corozal Meat Processing Inc.
Empacadora La Montaña Inc.
General Fashions Corp.
José Luis Fabrics Inc.
Playtex Corozal Corp.
Proenco Corp.

Dorado
All Steel Manufacturing
Benckiser Puerto Rico Inc.
Best Quality Top Mfg. Inc.
C.P.I. del Caribe Ltd.
Cantera Dorado Inc.
Dorado Carton Co. Inc.
Ecolab Manufacturing Inc.
Emerson Electric Co. Div. #5
Emerson Puerto Rico Inc. Div. #4
Emerson Puerto Rico Inc. Div#6
Emulex Caribe Inc.
Engineered Parts & Services Inc.
Fortiflex Inc.
Mc Neil Pharmaceuticals Corp.
Metal Machining Co. Inc.
Playtex Dorado Corp.
Ramírez Brothers
San Juan Cement Co.
Tool Makers Inc.

Florida
International Custom Molders of P.R. Inc.
Treesweet of Puerto Rico Inc.

Hatillo
Alicia Plastics Inc.
Borinquen Container Corp.
Emblems Inc.
Empresas Nolla y Amado
Master Mix de P.R. Inc.
Pan-Am Shoe Co. Inc.
Productos Eli
Quality Hardware Mfg. Inc.
Quesos del Reycito
Tropical Pole Inc.

Isabela
Adriano Aluminum Extrusion
Awning Windows Inc.
Elite Vertical Blinds
Isabela Printing Inc.
Isabela Shoe Corp.
Kent Meters of P.R. Inc.
Master Aggregates Toa Baja Corp.
Outdoor Footware Co. (The)
Power Electronics Inc.
Terrazos Cofresi Inc.
Tropical Candy

Lares
Aserradero Ramón Velez
Coach Internacional
Kiddies Manufacturing Inc.
Productos La Torre

Manatí
Cyanamid Agricultural de P.R. Inc.
Davis & Geck Inc.
Du Pont Agrichemicals Caribe Inc.
Du Pont Electronic Materials Inc.
Du Pont Merch Pharma
G.H. Bass Caribbean Inc.
Monte Bello Meat Processing Inc.
N.A.W. Corp.
Ortho Biologics Inc.
Ortho Pharmaceuticals Corp.
Playtex Apparel Corp.
Procter & Gamble Pharmaceuticals P.R. Inc.
Rhone-Poulenc Rorer Puerto Rico
Roche Products Inc.

continua en la página siguiente

Safety-Kleen Envirosystems Co. P.R. Inc.
Schering Plough Products Inc.
Tri-Line Co. (The)

Morovis
Air Master Awning Inc.
Eastpak Mfg. Inc.
Grand Master Sales Co. Inc.
Jardines Bakery
La Campesina Food Products Inc.
Laminados Modernos de P.R. Inc.
Provimi de P.R. Inc.
Rebmar Inc.
Rico Chef Food Products Inc.
Rolon Manufacturing Corp.
Sweet Fashions Inc.

Quebradillas
Cartonera Quebradillana
Cooperativa de Empresas Industriales
De Jesús Millwork
Empresas del Guajataca Inc.
Glamourette Fashion Mill Inc.
Sebastián Designers Mfg. Inc.

San Sebastián
Asociación para un Mundo Mejor
Avon-Lomalinda Inc.
Cajas Mayorfes
Caribe Tropical
Danzeny Manufacturing Inc.
Eric's Industries Inc.
Hanes Menswear Inc.
La Procesadora Food Corp.
Manufacturera Ramos Inc.
Natufruit Conservas Inc.
New Actino Inc.
Pepino Concrete Poles
Productos Doña Yiya
Torrefacción Café El Coquí Inc.
Universal Door & Window Manufacture Inc.

Toa Alta
Bayamón Tobacco Corp.
Caribe Furniture Mfg. Corp.
Central Carton Corp.
El Borincano Feed Mills Inc.
Hygienics Products Internacional Inc.
J.R. Quality Metals Corp.
Jasem Inc.
Muebles Torres
Ortho-Tain Enterprises
Plastimex Inc.
Rockvale Inc.
T.I.I. Industries Inc.

Toa Baja
Agregados Monteclaro
Alfa Casting Corp.
Bayamón Bumpers
Bayamón Can Inc.
Bell Air Industries of P.R.
Boricua Wood Processing Inc.
Chain Link Fence & Wire Products of P.R.
Challenger Brass & Cooper Co. Inc.
Coco Lopez U.S.A. Inc.
Cuttler-Hammer de P.R. Inc.
Delogar Food Inc.
Easton Inc.
Ebanistería Rodríguez
Empresas La Famosa
Fuentes Concrete Pile
Gran Master
Holsum Bakers of P.R.
Industrial Stainless Corp.
Jor-Nel Steel Works
Kane Export Services Inc.
Legend Internacional Corp.
Macaribe #2
Marcus & Alexis Sportswear Inc.
Master Concrete Corp.
Master Products Corp.
Master-Lite Products Inc.
Metropolitan Marble Corp.
Mitsubishi Motors Sales of Caribbean Inc.
Pescadería Atlántica
Pocholo Machine Shop
Precision Plastic Products Corp.
Rico Plastics
Sand & Gravel Export Corp.
Scorpio Recycling Inc.
Seaboard Bakeries Inc.
Simmons Caribbean Bedding Inc.
Taini Marble
Tooling & Stamping Inc.
Trigo Corp.
Tropical Fertilizer Corp.

Vega Alta
Able Manufacturing Corp.
Caribe General Electric Control Inc.
Caribe General Electric Fabrication Inc.
El Morro Corrugated Box Corp.
Inland Paper Corp.
Margo Faros del Caribe Inc.
Mark Trece of P.R.
Olimpic Playground Mfg. Co. Inc.
Owens-Illinois de P.R.
P.H. Guex Tooling & Fastening Sys. America
Pharmagraphics Puerto Rico Inc.
Teledyne Packaging P.R. Inc.
Terraza Aggregates Inc.
West Co. de Puerto Rico Inc.

Vega Baja
Aerospace Systems-Power Div.
Blue Ribbon Tags & Labels of P.R. Inc.
Caribe General Electric Power Breakers
Dac Industries Inc.
Fábrica Amionys Rodríguez
Fábrica de Bloques Vega Baja-Div. Adoquines
Fábrica de Bloques Vega Baja
Filete Foods
Harvey Hubbell Caribe Inc.
Maxi Prints Co.
Medtech Plastics Puerto Rico Inc.
Motorota Electrónica de P.R.
Muebles La Ponderosa
Rodríguez y Armaiz Inc.
Running Manufacturing
Thomas & Betts Caribe Inc.
Thomas & Betts P.R. Corp.
V'Soske Inc.
Warner-Lambert Inc. V.B. Operations

continuación de la página 64

La industria principal en la región caliza del Norte es la industria farmacéutica, la cual depende del uso del acuífero de la costa norte. En el proceso de utilizar este abasto de agua, la industria farmacéutica ha contaminado parte del acuífero. La región también está sujeta a perturbaciones de importancia económica tales como deslizamientos de tierra, **subsidencia**, inundaciones, sequías y huracanes. En esta sección hablaremos sobre el agua, otros minerales, la agricultura, la silvicultura y las perturbaciones ambientales dentro de la franja kárstica.

Agua

Los recursos de agua de la franja kárstica son abundantes; la mejor manera de describirlos es mediante el balance hidrológico de la región (figura 17). El acuífero de la costa norte representa la mayor parte de los recursos de agua de la franja kárstica. Los ríos que fluyen por la región traen el agua desde la formación volcánica del norte en la cordillera central. En algunos de éstos, el río Guajataca, el río Grande de Arecibo, el río de La Plata y el río Cibuco, hay represas usadas para abastos de agua o para la generación de energía eléctrica. De la precipitación en la franja kárstica, unos 650 mm, el 37 por ciento, fluye por los ríos y acuíferos a la zona costera y eventualmente hasta el océano. Más de 0.37 Mm^3/d (100 mgd) de agua dulce fluyen por el acuífero de la costa norte y descargan en la zona costera y el océano. La región posee las reservas de agua más abundantes de Puerto Rico y el bienestar de muchas comunidades depende de estos abastos.

Entre 1980 y 1995, las extracciones de agua subterránea por parte de entidades públicas de abastecimiento en Puerto Rico aumentaron de 0.28 Mm^3/d (75 mgd) a 0.34 Mm^3/d (95 mgd) (figura 30). Esto equivale al 22 por ciento del total de extracciones de agua dulce por parte de entidades públicas de abastecimiento en la Isla. El patrón de extracción refleja un constante ascenso salvo por el periodo entre 1989 y 1990, cuando la Isla sufrió una fuerte sequía. La extracción del agua subterránea por parte de entidades públicas en los municipios dentro de la franja kárstica sigue la misma tendencia de las extracciones de agua subterránea en el resto de la Isla. Para comparación, las extracciones del agua subterránea en 1960 fueron de 0.02 Mm^3/d (4 mgd) entre San Juan y

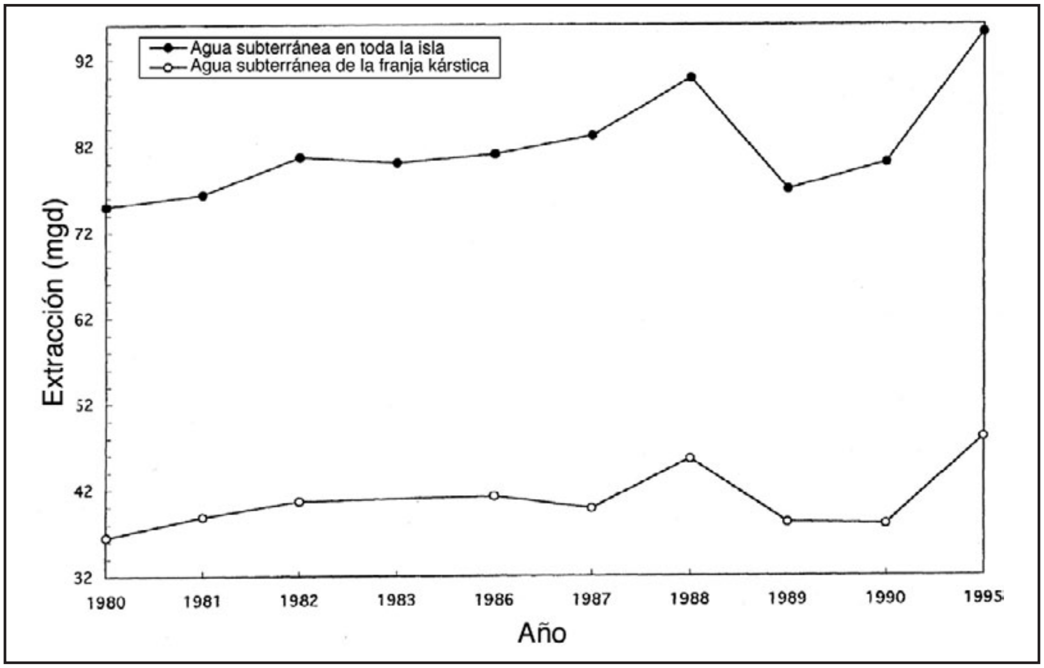

Figura 30. Tendencias en la extracción anual de agua subterránea por las entidades públicas de Puerto Rico y en 13 municipios de la franja kárstica. Los municipios se enumeran en la tabla 14. Los datos provienen de Gómez Gómez y otros (1984), Torres Sierra y Avilés (1986), Dopazo y Molina Rivera (1995), Molina Rivera y Dopazo (1995) y Molina Rivera (1997, 1998).

Cataño, 0.05 Mm^3/d (13 mgd) entre Bayamón y Arecibo y 0.02 Mm^3/d (6 mgd) entre Arecibo y Aguadilla (McGuiness 1963).

Para el 1995 la cantidad total de agua subterránea extraída para el uso doméstico, comercial, industrial, minero y para energía termoeléctrica, ganadería y riego en Puerto Rico fue de un promedio de 0.55 Mm^3/d (146 mgd) (Molina Rivera 1998). Esto equivale a un 25.8 por ciento del total de agua dulce extraída para ese año. Para los Estados Unidos en ese mismo año, la proporción correspondiente fue un 19.3 por ciento (Solley y otros 1998). El agua subterránea es una fuente de abastecimiento más importante en Puerto Rico que en los Estados Unidos (foto 51).

Foto 51. Bombas de agua subterránea de la Compañía de Aguas de Puerto Rico en Dorado, Puerto Rico. Foto de L. Miranda Castro.

De los acuíferos de agua subterránea en Puerto Rico, el acuífero de la zona caliza del norte es el más importante, seguido por el acuífero aluvial en la costa sur. El acuífero de la costa norte representa desde un 33 a un 35 por ciento de todas las extracciones de agua subterránea en Puerto Rico. La industria farmacéutica y la industria electrónica de la Isla utilizan el agua de este acuífero. Para el 1990, el uso total del agua del acuífero de la costa norte fue 0.20 Mm^3/d (52 mgd) (Molina Rivera 1997), distribuido como sigue: 0.14 Mm^3/d (38 mgd) para el abasto público - el mayor entre los acuíferos de la isla; 0.03 Mm^3/d (9 mgd) para uso doméstico e industrial - el 61 por ciento de la utilización en la Isla; 0.010 Mm^3/d (2 mgd) para minería y energía termoeléctrica - el 40 por ciento del uso para este propósito en la isla; y 0.011 Mm^3/d (3 mgd) para riego y ganadería - el 5 por ciento del total usado en la Isla para este propósito.

Resumimos la extracción de agua subterránea por parte de las entidades públicas de abastecimiento (tabla 14) y el uso de agua subterránea (tabla 15) para 13 municipios en la franja kárstica que usaban el agua subterránea en 1995 (Molina Rivera 1998). Los datos indican que el 79 por ciento de las extracciones de agua en estos municipios es del agua subterránea, contrario al promedio de 22 por ciento para toda la isla. En estos municipios hay unas 340,000 personas, el 9.6 por ciento de la población de la Isla, que dependen del agua subterránea; esto equivale a un 41 por ciento de toda la población de la isla que depende del agua subterránea para su abasto de agua, es decir, un total de 827,000 personas.

El agua subterránea extraida individualmente en estos municipios sumaba 0.05 Mm^3/d (12.5 mgd) o el 61 por ciento del total para la isla en esta categoría de uso del agua subterránea. El uso de agua subterránea autoabastecida en el sector industrial fue notablemente alto en la franja kárstica, es

Tabla 14. Extracción de agua subterránea por entidades públicas y total de personas servidas por agua subtrerránea en los municipios de la franja kárstica. No se incluyen Aguadilla, Isabela y Toa Alta porque estos municipios sólo extraen agua superficial. Estos datos se tomaron de Molina Rivera (1998) y corresponden al año 1995. Para convertir millones de galones por día a m^3/d, se multiplica por 3,785.

Municipio	*Agua Subterránea*	*Agua Superficial (millones de galones por día)*	*Total*	*Agua Subterránea (% del total)*	*Personas Servidas*
Aguada	0.15	0.00	0.15	100	1640
Arecibo	13.76	2.28	16.04	86	76710
Barceloneta	2.94	0.00	2.94	100	22000
Camuy	0.57	1.03	1.60	36	13990
Dorado	8.18	0.00	8.18	100	32120
Florida	1.60	0.00	1.60	100	8740
Hatillo	1.15	3.76	4.91	23	12190
Manatí	7.92	0.00	7.92	100	39460
Moca	0.49	0.36	0.85	58	4500
Quebradillas	0.36	3.14	3.50	10	3090
Toa Baja	3.63	0.00	3.63	100	91140
Vega Alta	1.78	0.15	1.93	92	30220
Vega Baja	5.52	1.84	7.36	75	3340
Total de la Franja Kárstica	48.05	12.56	60.61	79	339140
Total de la Isla	95.08	335.78	430.86	22	827000

Tabla 15. Abastecimiento de agua de fuentes públicas (agua superficial y subterránea), agua subterránea autoabastecida, uso de agua subterránea por el ganado y tratamiento de aguas usadas por entidades públicas para los municipios de la franja kárstica. No se incluyen Aguadilla, Isabela y Toa Alta porque estos municipios sólo extraen agua superficial. Todos los datos se indican en millones de galones por día (mgd) (Molina Rivera 1998) y corresponden al año 1995. Para convertir los mgd a m³/d, se multiplica por 3,785. Celdas vacías = no hay datos.

Municipio	Agua Abastecida de Fuentes Públicas			Agua Subterránea Autoabastecida			Animales+	Núm. de animales	Tratamiento de Aguas Usadas
	Doméstico	Comercial	Industrial	Doméstico	Industrial	Minería			
Aguada	2.42	0.22	0.04	0.01	0.00	0.00	0.01	5873	3.53
Arecibo	4.72	1.69	0.10	0.38	1.16	0.00	0.69	235811	6.66
Barcelonesa	1.02	0.36	0.01	0.44	3.02	0.00	0.05	2567	4.85
Camuy	1.35	0.37	0.02	0.06	0.00	0.00	0.37	23217	1.22
Dorado	1.70	0.33	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	1.35	
Florida	0.41	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	2355	0**
Hatillo	1.39	0.39	0.04	0.19	0.00	0.00	0.92	71064	0
Manatí	2.07	1.09	0.08	0.06	1.49	0.67	0.18	10714	0
Moca	1.08	0.18	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	3891	0
Quebradillas	1.11	0.24	0.01	0.03	0.00	0.00	0.15	9735	0
Toa Baja	4.82	0.68	0.21	0.00	0.00	0.18	0.06	3270	0
Vega Alta	1.90	0.39	0.25	0.08	0.00	0.03	0.01	2087	0.94
Vega Baja	2.86	0.56	0.06	1.51	0.00	0.68	0.09	7949	1.84
Total franja kárstica	26.85	6.57	1.17	2.76	5.67	1.75*	2.56	378533	20.39
Total de la isla completa	171.19	60.91	14.09	6.37	6.89	2.82	4.45	12042485	184.75

\+ Agua subterránea usada para animales incluye ganado lechero, ganado vacuno, cerdos, ovejas, cabras y aves. Excluye caballos y conejos.
* Incluye 0.19 mgd para Isabela.
** Los municipios con "0" están conectados a nivel regional.

Foto 52. Planta de filtración de agua potable Cordillera en Ciales, Puerto Rico. Foto de L. Miranda Castro.

decir, un 81 por ciento del total para toda la isla.

El tratamiento de aguas usadas en estos municipios fue de un 11 por ciento del total para toda la isla, una cantidad desproporcionadamente baja en función del uso global del agua y la densidad poblacional (foto 52). La población rural no está conectada al sistema de tratamiento de aguas usadas. Por lo tanto, una cantidad considerable de aguas usadas descargab a los acuíferos y a las aguas superficiales de la franja kárstica; dependiendo de sistemas naturales para la absorción y dilución de las cargas de nutrientes.

Otros Minerales

Los principales recursos minerales de la franja kárstica son la dolomita, la dolomita calcítica, la dolomita de roca, las arenas silíceas y las arenas que contienen magnetita (Picó y otros 1975). Se ha encontrado plomo, cinc, plata y lignita en el ecotono con la roca volcánica al sur de la franja kárstica. La caliza y el mármol de la caliza del Sur también se utilizan comercialmente.

Monroe (1967, 1971) comentó sobre la geología económica y la ingeniería geológica del karso. El carbonato de calcio en la caliza se puede usar como caliza de agricultura (de las canteras de la Caliza Lares), que sirve de materia prima para el hormigón, como fuente de arena manufacturada y como "mármol" para el terrazo. El cemento Portland se fabrica de las canteras de las Calizas Aguada, Aymamón y Juana Díaz (foto 53). Durante el proceso de manufactura se compensa por las deficiencias de sílice y alúmina en la caliza al añadirle piedras volcánicas (Monroe 1980). Se extrae caliza de las abundantes

Foto 53. Cantera de caliza, Ciales, Puerto Rico. Foto de L. Miranda Castro.

canteras de las Calizas Aymamón y Aguada, para usarse como material de relleno. La pureza de partes de la Caliza Aymamón es de calidad química. La dolomía calcítica reconocible por su textura de azúcar, se encuentra en la Caliza Aymamón, cerca de la costa, con un 18.5 por ciento de MgO. Las cavidades de la Isla de Mona se explotaban comercialmente para la extracción de guano.

S.S. Goldich identificó el mineral boehmita (yAlO.OH) - uno del grupo de minerales que constituyen la bauxita, mena principal del aluminio - en varias muestras de suelo recogidas de los sumideros de la Formación Lares (Nelson y Monroe 1966). La presencia de arcilla bauxítica en la franja kárstica se consideró de gran importancia económica, cuando se utilizaron como criterio los depósitos de bauxita en las zonas del karso de Jamaica y La Española (Hill y Ostojic 1982, Lafalaise 1980, Hernández 1978). En 1998, Jamaica produjo más de 12 millones de Mg (toneladas métricas) de bauxita, el tercer productor más importante en el mundo. Hildebrand (1960) confirmó la presencia de boehmita y publicó ocho análisis químicos de las arcillas con boehmita que reflejaban un contenido de hasta un 40 por ciento de Al_2O_3. Estos resultados favorables incitaron a una extensa perforación comercial, que, sin embargo, no arrojó ningún depósito de bauxita de interés económico (Nelson y Monroe 1966).

Los suelos con arcilla de bauxita fueron identificados al sur del municipio de Florida (Hildebrand 1960, Cruzado Torres 1996). Las arcillas de bauxita de esta zona aparentemente se limitan a los suelos en las depresiones en la zona de afloramiento de la Caliza Lares. Los suelos recogidos en la zona al norte del municipio de Florida y la zona de afloramiento de la Formación Cibao contenían caolinita y/o halloysita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) como componentes dominantes (Hildebrand 1960, Cruzado Torres 1996). Los depósitos de bauxita en Jamaica ocurrían en las depresiones en la caliza blanca del Terciario. Debido a que esta caliza es de una pureza extraordinaria, se considera improbable que sea de origen residual. La presencia de la bauxita se explica como derivada de los efectos de la meteorización y la lixiviación del detrito volcánico arrastrado por el agua hacia depresiones de antiguas rocas volcánicas del Cretáceo y el Eoceno (Zans 1959, Chubb 1963) o de cenizas traídas por el viento desde los volcanes de Centroamérica (Comer 1974).

Los depósitos de arcilla bauxítica que ocurren en las depresiones de la Caliza Lares probablemente fueron formados mediante una meteorización y la lixiviación muy intensa de los depósitos de arenas de manto (Briggs 1966). En la zona de afloramiento de la Caliza Lares se dieron las condiciones de lixiviación intensa, la remoción del SiO_2, mientras que en las calizas más al norte la caolinita y la halloysita permanecían estables y no fueron alteradas por las arcillas de bauxita.

Las dunas en la costa norte pueden proveer una reducida cantidad de arena calcárea, idónea para la elaboración del hormigón. Las arenas silíceas se extraen de canteras llanas en parte del cuadrángulo de Manatí y se utilizan en la fabricación de vidrio. También hay arena y grava disponibles en el miembro Guajataca de la Formación Cibao en Quebradillas. Existen estructuras aptas para pruebas de petróleo y gas natural en el cuadrángulo de Quebradillas, al norte del pueblo de Quebradillas. Estas secuencias ocurren entre los 1,200 a 1,850 m en la roca sedimentaria al norte - entre Quebradillas e Isabela y al oeste de Vega Baja - y en el sur - entre Ponce y la desembocadura del río Tallaboa (Monroe 1980).

Agricultura

"Los mogotes escarpados, rocosos e improductivos seguramente se prestan para la silvicultura con árboles adaptados a suelos poco profundos, más que para otros cultivos que arruinarán su escaso suelo".

Picó (1950, p. 148).

Los usos agrícolas de la zona caliza del Norte se han documentado ampliamente (Picó 1950). La topografía es un factor determinante de la actividad agrícola en esta zona de Puerto Rico (foto 54). Sólo el 28 por ciento de la zona es apta para la actividad agrícola en la región caliza (tabla 2). Los usos de importancia económica se limitan a los suelos aluviales (Picó 1950). Sin embargo, en el pasado hasta los suelos pedregosos de la caliza de la Cuesta Lares y en el fondo de los sumideros se cultivaban. El tabaco, la caña de azúcar, el café y otros cultivos se sembraban con cierto éxito como cultivos de subsistencia. Pool y Morris (1979) describieron este entorno agrícola tradicional: "Se cultivaban cítricos, guineos, plátanos, aguacates y tabaco. La fuerza laboral de la familia (el padre y sus dos hijos) hace la roturación, desyerba, siembra y cosecha a mano. Se llevan los productos se llevan a caballo hasta la carretera (aproximadamente 1.5 km). Los animales, que se crían mayormente para el consumo doméstico, incluyen 8 vacas, 3 cerdos, 25 gallinas ponedoras, 3

Foto 54. Cultivo de piña en Vega Baja, Puerto Rico. Foto de L. Miranda Castro.

caballos y 10 gallos de pelea".

Los suelos aluviales que cubren la zona caliza del Norte son de los mejores suelos de Puerto Rico (Abruña y otros 1977). Son terrenos agrícolas de óptima calidad, idóneos para la producción de alimentos para humanos y animales, forraje, fibra y semillas de aceite. Estos suelos de óptima calidad agrícola tienen las condiciones, las temporadas de cultivo y la entrada de humedad necesarios para producir cultivos de gran rendimiento cuando se tratan y administran de manera apropiada. El declive es de 0 a 12 por ciento y los suelos no son excesivamente erosionables ni están saturados de agua durante la temporada de crecimiento (Acevido 1982). En la zona de Arecibo, el 16 por ciento de los terrenos, unas 162,786 ha entre Camuy y Vega Alta, son terrenos de óptima calidad agrícola. El río Grande de Arecibo se ha usado intensamente para fines agrícolas, como por ejemplo, para la caña de azúcar, pastizales cultivados para el ganado lechero y de carne, así como para el arroz; de hecho, se propuso como zona para aumentar la producción arrocera (Quiñones Aponte 1986). En Barceloneta, Manatí y Vega Baja, grandes extensiones de terreno se dedican al cultivo de piñas (Conde Costas y Gómez Gómez 1999) (foto 55). Otros usos agrícolas tradicionales de los suelos aluviales incluyen plátanos, toronjas - la mitad de la producción de la isla - la batata, la yautía, el algodón, el coco y los vegetales (Picó 1950, Acevido 1982). Muchos de éstos se cultivaban para exportación a los mercados de invierno de Estados Unidos (foto 56). Los cultivos de subsistencia incluían ñames, yucas, guineos, plátanos, habichuelas y otros.

Foto 55. Cosecha de piña. Foto de L. Miranda Castro.

Foto 56. Los productos agrícolas de los valles aluviales son para exportación. Foto de J. Saliva.

Los suelos que no son de calidad agrícola óptima y los suelos no aluviales contienen arenas de manto que se originan fuera de la región caliza, pero son transportados a la región y cubren los depósitos calizos. Estas arenas de manto se han agrupado en cuatro tipos (recuadro 13). Otros suelos, los arenosos que no son de manto y los no aluviales, son parte de cuatro series principales de suelos a lo largo de la costa norte: Coto, Bayamón, Soller y Tanamá; y una en la caliza del Sur: Aguilita (Picó y otros 1975). La serie Coto se encuentra en los llanos de Quebradillas y la serie Bayamón ocurre al este de estos llanos. Los suelos de la serie Soller son suelos de poca profundidad y negros con un alto contenido de materia orgánica y arcilla. Los suelos de Tanamá ocurren en los mogotes. Los suelos de Aguilita son análogos a los de Tanamá en las lomas calizas del Sur.

Fuera de los suelos

Recuadro 13. Arenas de manto de la región caliza del Norte. (Monroe 1976, basado en Roberts 1942).

Las arenas de manto que cubren la caliza y rellenan los espacios entre los mogotes y las crestas no se derivan de la caliza. No contienen material calcáreo, tienen su origen fuera de la franja kárstica, en el interior volcánico y fueron transportadas por los ríos hasta la costa y posteriormente alzadas por encima del nivel del mar por las fuerzas tectónicas. Luego de la deposición, este material, intercalado parcialmente con superficies parcialmente karstificadas, fue meteorizado hasta convertirse en tierra laterítica. Estas arenas son depósitos de los primeros ríos que existieron cuando la isla acababa de surgir del océano. La presencia de estas arenas influye en el proceso de karstificación de la caliza porque representan una fuente de agua ácida que afecta la caliza subyacente. También son zonas de recarga del acuífero (Giusti 1978). Roberts (1942) subdividió los suelos de la franja kárstica en cuatro grupos:

1. Compacto—suelo arcilloso, medianamente profundo, rojizo o amarillento, sobre caliza. Suelo ácido, 90 por ciento arcilla.
2. Friable—arcilla y suelo arcilloso, medianamente profundo a profundo, rojizo o amarillento, sobre caliza. Suelo ácido, 74 a 93 por ciento arcilla.
3. Muy friable—arena arcillosa y arena, medianamente profundo a profundo, rojo o amarillo, sobre caliza. Suelo ácido, 76 a 92 por ciento arena.
4. Suelto—profundidad media, arena de color claro. Ácido.

Tabla 16. Tipos de suelos en la región propuesta para designación como tierras de dominio público. Todos estos suelos están clasificados como no aptos para uso agrícola (Gierbolini 1975, Acevido 1982). Existen solo unos pequeños bolsillos de suelos aptos para el cultivo artesanal. La extensión total de suelos no aptos para la agricultura es de 78,750 ha entre Aguadilla y Vega Baja. El área aproximada (ha) de este suelo en la franja kárstica se indica en paréntesis.

RsF — Afloramiento rocoso - Complejo San Germán. Pendientes de 20 a 60 por ciento; lecho calizo expuesto y suelos someros bien drenados en las lomas. Utilizado para pastizal (1,087).

Ro — Afloramiento calizo. Lomas empinadas a muy empinadas en que la caliza expuesta cubre el 95 por ciento de la superficie (225).

RtF — Afloramiento de roca Tanamá (22,698).

SmF — San Sebastián arcilla con grava. Pendientes de 20 a 60 por ciento. El suelo es profundo, empinado a muy empinado y bien drenado. Las cumbres y las laderas de las lomas son aptas para pasto y el cultivo de árboles (9,098).

Afloramiento calizo y caliza San Sebastián — Afloramientos calizos de suelo moderadamente profundo, empinado y muy empinado, poroso, con grava y arcilla. Los suelos se caracterizan por numerosos afloramientos y por las rocas, guijarros y grava superficial (21,949).

SrF — Complejo de afloramiento rocoso Soller. Pendientes de cinco a 60 por ciento. Declive leve a empinado; suelos bien drenados y alguna caliza expuesta (18,410).

Asociación Colinas — Suelos de declive leve a empinado en lomas bajas y empinadas, de cumbre redondeada. Suelos someros a moderadamente profundos, porosos, margosos y arcillosos con numerosos afloramientos calizos (5,283).

aluviales, la actividad agrícola fue limitada por la topografía accidentada y los suelos de poca profundidad de poca retención de humedad y poca fertilidad (Ríos Lavienna 1933, Picó 1950). Los suelos no aptos para uso agrícola predominan en las lomas calizas de la franja kárstica. Estos constituyen unas 78,750 ha y se describen en la tabla 16. En general, los suelos de poca profundidad en las laderas de los mogotes son demasiado escarpados y pedregosos para el cultivo o siquiera el pastoreo de ganado (Pool y Morris 1979). La agricultura fue posible en los sumideros y valles de disolución entre los mogotes (foto 57). En estas regiones, hay bolsillos de suelos fértiles y profundos, pero su extensión es limitada. En los mogotes en sí hay pequeñas acumulaciones de suelo de muy difícil cultivo porque hay que usar herramientas manuales y el área es muy reducida. A pesar de las limitaciones, a través de los años se cultivaron la caña, el café, el tabaco y alimentos como yautía, yuca, ñame, batata, habichuelas, maíz, chinas y guineos para consumo local (Ríos Lavienna 1933). El consumo local de estos alimentos siempre fue alto, y en 1938 se canceló el plan para establecer un molino de harina de maíz en Isabela cuando se determinó que el consumo local del maíz era tan alto que no quedaba suficiente maíz para procesar en el molino (Picó 1950).

Los huracanes y los cambios en las condiciones económicas de la Isla acabaron con la actividad agrícola en la región caliza del Norte. El huracán de 1928, San Felipe, acabó con la producción del café en los suelos marginales. El aumento en la actividad de cultivo de la caña también afectaron la producción de café y tabaco. El cambio a la economía industrial luego de la década de 1940 luego resultó en la eliminación del cultivo de la caña. La expansión de la producción arrocera sufrió debido a la falta de agua dulce, ya que las cuñas de agua de mar que

Foto 57. Agricultura de subsistencia en los valles entre los mogotes. Foto de J. Colón.

penetraron en los estuarios fluviales limitaron el abasto de agua dulce disponible para el cultivo del arroz cerca de la costa. El abandono de la actividad agrícola produjo cambios fundamentales en la cubierta del terreno, como se comentará en la sección sobre el cambio en el uso de los terrenos.

Silvicultura

Los matorrales y los bosques constituyeron el uso más extenso de la lomas de la franja kárstica. Los mogotes proveían la mayor parte de la leña usada para elaborar el carbón vegetal que se utilizaba como combustible en la Isla. También se producían otros productos de la silvicultura, tales como estacas para cercas y mangos de escoba. El café se cultivaba a la sombra de los árboles madereros, que eran a su vez fuente útil de madera de construcción y otros productos (foto 58). Las hojas de la palma yarey o sombrero (*Sabal causiarum*) se cosechaban para la producción de escobas, sombreros, canastas y techos para las casas. Para el 1936, la industria local basada en esta palma producía un ingreso anual bruto de $38,000, una parte importante de la economía de la zona (Picó 1950).

Las maderas de los bosques del karso facilitaron la vida de los taínos y los colonizadores europeos. Los bosques acumulaban y mantenían suelos aptos para la agricultura de subsistencia que sirvió de sostén para los habitantes de la región durante siglos. Muchas de las plantas más importantes de Puerto Rico provienen del

Foto 58. Muebles y otros productos del bosque utilizados en una ebanistería local—Muebles Villalobos, Ciales, Puerto Rico. Foto de L. Miranda Castro.

bosque del karso, como por ejemplo, la maga (*Thespesia grandiflora*), el aceitillo (*Zanthoxylum flavum*) y el moralón (*Coccoloba pubescens*); plantas medicinales como el almácigo (*Bursera simaruba*); y palmas, como las palmas de coyor, de lluvia y de sombrero.

En la actualidad, los bosques del karso albergan las mejores plantaciones de árboles de la isla (Francis 1995). De las 3,992 ha que se calculan como tierras dedicadas a plantaciones madereras en Puerto Rico, 1,210 ha, un 30 por ciento del total, corresponden a los bosques del gobierno del Estado Libre Asociado en la franja kárstica. La mayor extensión de plantaciones madereras de la franja kárstica se encuentra en el Bosque Estatal de Guajataca, que cuenta con 627 ha. La caoba (*Swietenia macrophylla* y *S. Mahagoni*), el majó (*Hibiscus elatus*), la maría y la teca (*Tectona grandis*), son algunas de las especies más comunes que se siembran para la producción maderera en la franja kárstica (foto 59).

Gran parte de la franja kárstica tiene más de un 85 por ciento de cubierta forestal (tabla 2). Estos bosques son de importancia crítica para la calidad ambiental futura de la región. Se requiere de un sabio manejo forestal para asegurar sus funciones ecológicas en el nuevo milenio.

Perturbaciones Ambientales

Las sequías y los huracanes representan los extremos climatológicos de la región caliza y de Puerto Rico. Aunque las sequías o los huracanes pueden ocurrir en cualquier momento, las sequías de corta duración suelen ocurrir en los primeros 4 meses del año, mientras que la temporada de huracanes se intensifica entre los meses de agosto a octubre. Además, los registros de la precipitación a largo plazo

Foto 59. Producción maderera de un plantación de árboles en el Bosque Estatal de Río Abajo, Arecibo, Puerto Rico. Foto de J. Colón.

reflejan un patrón decenal de años alternos con niveles de precipitación por encima y por debajo del promedio (Lugo y García Martinó 1996). Las lluvias de baja intensidad de 76 mm/d recurren una vez al año mientras que las lluvias de alta intensidad mayores de 305 mm/d son posibles durantes las condiciones huracanadas o cuando los sistemas de baja presión se vuelven estacionarios. Estos eventos recurren cada 100 años (Gómez Gómez 1984).

Los huracanes desempeñaron un papel fundamental en terminar con usos marginales, como ciertas actividades agrícolas, en terrenos de la franja kárstica. Por ejemplo, la desaparición de la producción cafetalera en esta región se atribuyó a huracanes que destruyeron las siembras en suelos de poca profundidad Un huracán u otro evento natural también puede afectar el equilibrio económico de ciertos cultivos de rendimiento económico marginal en la franja kárstica (Picó 1950). Los huracanes suelen estar acompañados por inundaciones y

derrumbes a gran escala. Tanto las inundaciones como los derrumbes son costosos por las perdidas que ocasionan a la infraestructura, la vida humana y la propiedad. Los bosques y otros ecosistemas naturales de la región caliza se recuperan rápidamente de los huracanes y las tormentas (Wadsworth y Englerth 1959, Lugo inédito). Más aún, estos eventos transportan grandes cantidades de agua dulce a la Isla y estimulan muchas funciones de beneficio ecológico, tales como la reproducción de plantas y animales del bosque kárstico.

En Puerto Rico, como en los Estados Unidos, el incremento de las inversiones en las medidas de control estructural de las inundaciones, mediante canalización y diques, ha resultado en un aumento en pérdidas y daños debidos a inundaciones (Lugo y García Martinó 1996). Estas estructuras ofrecen protección en contra de eventos de cierta magnitud y frecuencia y producen un falso sentido de seguridad en contra de todos los posibles eventos. Por consiguiente, aumentan la construcción en las zonas inundables, lo cual resulta en niveles aún más altos de inundación debido al aumento en la escorrentía. Cuando un evento meteorológico excede la capacidad de diseño de la estructura, se inundan grandes extensiones de terreno y los daños pueden ser cuantiosos. Ejemplo de esto son las inundaciones relacionadas con el huracán Hortensia, que resultaron en grandes daños en las partes del río Bayamón que se habían canalizadas para ofrecer protección en contra de inundaciones, pero no aquellas como las que generó Hortensia.

La deposición de aluvión y la renovación de los suelos en las planicies costeras durante las inundaciones constituye un proceso geológico de vital importancia en el mantenimiento de la fertilidad y estabilidad de la zona costera. Más aún, el proceso limpia las aguas del cauce inundable y protege los sistemas marinos y costeros. La canalización obstaculiza este proceso y aumenta la pérdida de terreno en la costa, que a la vez perturba los sistemas marinos al descargar grandes cantidades de sedimentos directamente al mar. Las soluciones estructurales a las inundaciones también aceleran la pérdida del agua dulce en el océano, lo cual a su vez agrava las sequías.

Las sequías se reflejan en la disminución de los caudales de los ríos y arroyos. El criterio de planificación para las condiciones de sequía prolongada utiliza los valores del caudal mínimo por siete días. Se requiere una cantidad mínima de agua para sostener la recarga del acuífero, impedir la **salinización**, asimilar la entrada de desperdicios domésticos e industriales, mantener la vida acuática y proveer abastos de agua para el consumo humano e industrial.

Derrumbes y Subsidencia

En los cañones del río Guajataca y de Corozal se producen derrumbes en los cuales grandes masas de la Caliza Aguada se han desprendido cuesta abajo hasta la cubierta arcillosa de la Formación Cibao. En el río Grande de Manatí y el río Indio, los derrumbes consisten principalmente de bloques de Caliza Aguada que se han desprendido de los riscos y han resbalado cuesta abajo en el miembro superior de arcilla de la Formación Cibao. Los derrumbes han afectado particularmente las carreteras modernas. Por ejemplo, las carreteras PR 111, entre Lares y San Sebastián, y PR 10, cerca de Utuado, se han cerrado por periodos extensos debido a repetidos

Recuadro 14. Los seres humanos se arriesgan al subestimar el reto del karso y el público pagará las consecuencias.

Ejemplo 1. En el 1928, el gobierno tomó la decisión de mejorar la productividad agrícola estableciendo un sistema de riego en la región Aguadilla-Isabela, el cual utilizaría el agua que bajaba por gravedad desde el embalse de Guajataca. Se invirtieron 4 millones de dólares con el objetivo de regar 5,909 ha. El embalse se construyó en la depresión Cibao justo en el punto en que el río Guajataca penetra la Caliza Aymamón, 8 km al sur-suroeste de Quebradillas. Desde ese punto, el cauce de desvío pasa 3.2 km al oeste del cauce del río Guajataca y unos 4.8 km al terreno regado, de suelo arenoso. En su funcionamiento más efectivo, el sistema regaba 2,364 ha, pero usualmente regaba unas 788 ha. La aportación de los agricultores nunca superó la cantidad de $30 a $40 mil en pagos anuales de agua, mientras que la expectativa había sido de $100,000 al año. El gobierno tuvo que subvencionar la operación e imponer una contribución a toda la isla para financiar el subsidio.

Ejemplo 2. El alineamiento y expansión de la carretera estatal PR 10 por el terreno accidentado de la franja kárstica resultó en que fuera la carretera más cara por kilómetro que se haya construido jamás en Puerto Rico. La carretera se propuso por primera vez en 1972 y se proyectaba que costaría unos $10 millones y estaría lista dentro de una década. Sin embargo, sólo los 4 kilómetros que atraviesan el Bosque Estatal de Río Abajo costaron unos $10 millones por kilómetro. Debido al reto técnico que representa la construcción en el karso, se produjo un video en colores con el título "Desafío a la naturaleza", en que se destacaban los retos técnicos y las soluciones propuestas que utilizaban tecnología importada de Europa. Más de 20 años después y bien pasada la fecha programada, la carretera se abrió con gran alarde. Sin embargo, unos meses después hubo que cerrarla debido a los derrumbes. Cada vez que la lluvia excede cierto límite, ocurren derrumbes a lo largo de la carretera estatal PR 10 y las cuadrillas de trabajadores se afanan por evitar el derrumbe crónico. Con la llegada del nuevo milenio, todavía hay cuadrillas que trabajan a tiempo completo en esta carretera. El costo de estabilizar los derrumbes y atender otros problemas geológicos e hidrológicos posteriores a la construcción significa que el costo de la carretera se ha elevado a más de $30 millones- y se sigue sumando. En una revista de ingeniería se destacaba un sector del proyecto como uno de los kilómetros de carretera más caros del mundo. Todos los costos fueron sufragados por los contribuyentes. Esto incluye pérdidas no contabilizadas tales como la destrucción del hábitat y la fragmentación de los bosques kársticos, los efectos en la flora y la fauna, la reducción en los abastos de agua dulce y la contaminación del acuífero, además del desparramamiento poblacional a lo largo del corredor de la carretera. El desarrollo incluye un aumento en la dependencia de pozos sépticos que aumentan aún más la contaminación del acuífero.

derrumbes (recuadro 14). En estos ejemplos, los derrumbes no se deben a los procesos de karstificación sino a la inestabilidad de la Formación San Sebastián y al alineamiento deficiente de las carreteras.

Los procesos de subsidencia resultan en la formación de sumideros de colapso en la caliza del Norte (Soto y Morales 1984), los cuales suelen ocurrir en las arenas de manto durante o poco después de aguaceros. La percolación del agua de lluvia aumenta la red de pasajes de drenaje en la caliza subyacente. Las arenas de manto se hunden en la superficie cuando los pasajes subterráneos son de diámetro reducido y se succiona la arena cercana. Con el tiempo, se comienza a formar una cavidad encima del contacto con el lecho rocoso. A medida que aumentan en diámetro los pasajes de drenaje y se percola más agua por éstos, la cavidad aumenta en tamaño porque se remueve más arena de la zona de contacto. El colapso de la capa de arena resulta en la formación de un sumidero de colapso. El nivel freático, que suele ser profundo en estas arenas de manto, no parece afectar la formación de sumideros de colapso. El análisis de las fotografías aéreas sugiere que la región en donde se forman los sumideros de colapso ha estado bastante estable desde 1936 y parece estar estructuralmente estabilizada: la mayoría de los sumideros están orientados hacia el noreste (Soto y Morales 1984). Los sumideros de colapso pueden estar secos o llenos de agua, dependiendo de que los pasajes de drenaje en la caliza estén abiertos u obstruidos con desechos. Ya que los eventos de subsidencia ocurren de repente, pueden causar pérdidas materiales devastadoras (ver el recuadro 16).

Inundaciones, Huracanes y Sequías

Como fenómenos recurrentes en Puerto Rico, los efectos de las inundaciones, los huracanes y las sequías dejan una huella apreciable tanto en los ecosistemas dominados por el ser humano como en los ecosistemas naturales. La descarga fluvial, la recarga de los acuíferos y la disponibilidad de los abastos de agua son proporcionales a la intensidad de precipitación en la región caliza. El comportamiento y el estado de los sistemas hidráulicos de la región son muy sensibles a la intensidad de la precipitación. Sin embargo, la intensidad de la precipitación varía en magnitud, y depende de la frecuencia estacional en que recurren los fenómenos como huracanes, tormentas, depresiones y sequías. En esta sección, nos concentramos en la frecuencia, la magnitud y los patrones estacionales de los eventos de precipitación asociados con el huracán Hortensia (9 a 10 de septiembre de 1996) y el huracán Georges, dos años después, además de la baja precipitación del año 1994 y los flujos históricos de los ríos de la caliza del Norte.

Río Culebrinas - La descarga mensual promedio más baja de este río ocurre en marzo, y la más alta ocurre en octubre. La descarga promedio histórica más alta y la más baja ocurrieron durante mayo de 1996 y abril de 1970, respectivamente. Partiendo de los 32 años de registro en la estación 1478 del USGS, calculamos una descarga promedio anual de 11.3 m^3/s cerca de su desembocadura. La descarga instantánea más alta fue el 16 de septiembre de 1975 con 1953 m^3/s. El huracán Georges causó la descarga diaria promedio más alta, de 481 m^3/s, el 22 de septiembre de 1998. La descarga del huracán Georges fue de una cantidad suficiente como para llenar el embalse de Loíza 1.5 veces ese día. Este caudal fue mayor que la descarga de **probabilidad de excedencia** de un uno por ciento por 594 por ciento, partiendo del análisis de duración del caudal para el 1994 (Atkins y otros 1999).

Río Guajataca - La descarga anual promedio de este río, más arriba del embalse de Guajataca, es de 0.19 m^3/s y la descarga diaria histórica más alta, de 14.3 m^3/s, ocurrió el 22 de septiembre de 1998, debido al huracán Georges. Los promedios mensuales históricos más altos y más bajos han ocurrido durante octubre y marzo, respectivamente.

Río Camuy - En la estación 0148 del USGS, este río tiene un caudal anual promedio de 3 m^3/s. Los caudales mensuales promedios más altos y más bajos han ocurrido durante septiembre y marzo, respectivamente. El huracán Georges produjo un caudal pico instantáneo y un caudal diario promedio, ambos históricos, de 328 y 225 m^3/s, respectivamente.

Río Grande de Arecibo - Este río tiene la descarga anual promedio más alta que cualquier otro río en Puerto Rico: 14.2 m^3/s, según los registros que se han llevado durante 23 años (estación 0290 del USGS). Los caudales mensuales promedio más altos y más bajos ocurren durante octubre y febrero, respectivamente. Durante septiembre de 1998, el caudal promedio diario fue más alto que el caudal de probabilidad de excedencia de un 10 por ciento por 21 días. La precipitación en dos estaciones de la cuenca hidrográfica (Jayuya y Orocovis) durante el huracán Georges fue de 559 y 592 mm, respectivamente, en un periodo de 24 horas, y el caudal diario promedio en la confluencia con el río Tanamá (estación 27750 del USGS) fue mayor que el caudal de probabilidad de excedencia del uno por ciento. El río Tanamá tiene un caudal anual promedio de 2.5 m^3/s. Durante el huracán Georges, se produjeron valores históricos máximos para los caudales pico instantáneos en la estación 0284 del USGS en el río Tanamá y la estación 0290 del USGS en el río Grande de Arecibo, más abajo de la confluencia con el Tanamá. Sin embargo, el río Grande de Arecibo, río arriba de la confluencia con el río Tanamá, no estuvo en su caudal histórico más alto. Esto demuestra la influencia del río Tanamá en el cauce mayor del río Grande de Arecibo.

El río Grande de Arecibo experimentó una inundación en 1899, cuando se estimó que la descarga pico fue de 6,853 m^3/s (Quiñones Aponte 1986). Para el 1986, la descarga mayor de este río,

desde que se había regulado, había ocurrido el 13 de octubre de 1954, cuando se midió la descarga en 1,473 m^3/s más abajo de la represa de Dos Bocas. La descarga pico histórica para la estación 27750 del USGS ocurrió en mayo de 1985 cuando se midió en 1,297 m^3/s. El valle aluvial bajo se inunda por completo alcanzando una profundidad promedio de 1.2 m, lo cual puede suceder cada 7 años cuando la descarga alcanza 481 m^3/s.

Durante el huracán Hortensia, el río Tanamá alcanzó su descarga diaria promedio más alta de 38.5 m^3/s (estación 0284 del USGS), un valor mayor que el caudal de probabilidad de excedencia de uno por ciento. Durante el huracán Georges, esta misma estación tenía una descarga diaria promedio de 181 m^3/s. En el río Grande de Arecibo (estación 27750 del USGS), se alcanzó una descarga diaria promedio de 348.2 m^3/s durante el huracán Hortensia, una descarga más alta que la alcanzada durante el huracán Georges, de 206.4 m^3/s. Durante el huracán Georges, el río Grande de Arecibo transportó cargas promedio de sedimento diarias de 85 Mg, un nivel máximo en su historia.

En 1994, la descarga diaria promedio en el río Grande de Arecibo, aguas arriba de su confluencia con el río Tanamá (estación 27750 del USGS), descendió a un valor mínimo histórico de 0.45 m^3/s. Entre mayo de 1994 y abril de 1995 hubo descargas mensuales mínimas promedio que en once ocasiones representaron marcas históricas. En el río Tanamá (estación 0284 del USGS), las descargas diarias promedio alcanzaron valores de 0.57 m^3/s, mucho mayores que los valores mínimos históricos de 0.12 m^3/s en mayo de 1989. Los caudales mínimos por periodos de 7 días, con diez años de recurrencia, se calcularon para esta estación en unos 0.75 m^3/s (Quiñones Aponte 1986).

Río Grande de Manatí - Este río tiene un caudal anual promedio de 329 millones m3 ó 10.4 m^3/s (Gómez Gómez 1984). Se desborda cada 2 años y pueden ocurrir grandes inundaciones cada 7 años. Todo el valle aluvial está sujeto a las inundaciones de por lo menos 1.8 metros de profundidad durante los eventos pico. La impresionante extensión de estas inundaciones se desprende del mapa elaborado por Hickenlooper (1967). En el puente de la carretera PR 2, la elevación del agua se midió a 10.06 m por encima del nivel promedio del mar en 1928. En esta etapa, el nivel del cauce principal está por encima del puente. Este evento recurre cada 39 años. La elevación del pico instantáneo en la estación 0381 del USGS durante el huracán Hortensia fue de un valor máximo histórico, 11.1 m, pero no se pudo calcular el caudal. El huracán Georges produjo un valor máximo histórico en la descarga diaria promedio, 2,276 m^3/s, 2,365 por ciento por encima del caudal de probabilidad de excedencia del uno por ciento. El río Grande de Manatí tiene caudales mínimos históricos, partiendo de registros llevados durante 9 años, de 1.44 m^3/s (Gómez Gómez 1984). Los caudales mínimos de 7 días ocurren en julio. En 1994, el río tuvo caudales bajos históricos durante 6 meses. El caudal diario promedio en la estación 0381 del USGS fue de 0.91 m^3/s, una disminución del promedio de 10.5 m^3/s. Las descargas promedio mayores y menores ocurren durante octubre y marzo, respectivamente.

Río Cibuco y el río Indio - En el caso del río Cibuco, las inundaciones son frecuentes y severas. (Torres González y Díaz 1984). Este río y el río de La Plata inundan grandes extensiones de terrenos (>46.6 km^2) a profundidades promedio de 1.8 a 2.4 m. La descarga pico de 793 m^3/s en 1965 que se dio en el río Cibuco tiene un periodo de recurrencia de 25 años. Durante el huracán Georges, el caudal diario promedio alcanzó 100.8 m^3/s en la estación 0395 del USGS. La descarga fue 312.6 m^3/s menos que el máximo histórico. Los promedios mensuales históricos de los valores de los caudales diarios alcanzan picos máximos durante mayo y noviembre y picos mínimos durante marzo y julio. Se han registrado caudales tan bajos como de 0.18 m^3/s para el río Cibuco (Torres González y Díaz 1984). Durante la sequía del 1994, el río Cibuco experimentó caudales de valores bajos históricos durante 5 meses. El caudal de base aguas abajo de la confluencia con el río Indio, estuvo por debajo del nivel freático y por consiguiente el río descargaba al acuífero (Sepúlveda 1999).

Como parte de la justificación para mejorar la planificación de la utilización del terreno (CE 1973), el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU (USACE) describió en detalle los problemas de inundación del río Cibuco y del río Indio: las inundaciones de grandes proporciones en 1915, 1965, 1966 y 1973. Se pronosticó que las inundaciones se agravarían cada vez más debido al desarrollo en las llanuras de inundaciones de estos ríos. Se puede consultar el informe del Cuerpo de Ingenieros para ver las impresionantes fotografías de los niveles previstos de las inundaciones relativo a las estructuras que existen ahora en esta región.

Río de La Plata - Una descarga pico de 3,398 m^3/s ocurrida en 1928 se consideró como la segunda inundación más grande en la historia de este río. Es probable que la inundación de 1899 haya sido aún más grande. La descarga de 2,705 m^3/s en 1960 tiene un intérvalo de recurrencia de 32 años (Torres González y Díaz 1984). El huracán Georges no produjo descargas históricas en la estación 0460 del USGS (en la carretera PR 2). Sin embargo, el huracán Hortensia produjo un pico instantáneo histórico de 8.3 m en la misma estación, aunque no se pudo calcular el caudal; y un caudal diario promedio histórico de 1,928 m^3/s. Este caudal era mucho más alto que el evento de probabilidad de excedencia de uno por ciento de 80.7 m^3/s, partiendo del análisis de duración del caudal que se ha hecho hasta 1994 (Atkins y otros 1999). Las descargas de 0.21 m^3/s constituyen los caudales mínimos típicos (Torres González y Díaz 1984). Las descargas mensuales promedio mayores y

menores ocurren en octubre y marzo, respectivamente. Debido a que las represas aguas arriba regulan al río de La Plata, sus estiajes mínimos se han reducido en un 60 por ciento.

Tabla 17. Cubierta terrestre — en ha — entre 1936 y 1983 en el Bosque Estatal de Río Abajo (Modificado de Álvarez Ruiz y otros 1997). Los totales pueden variar debido al redondeo.

Cubierta Terrestre	*1936*	*1950*	*1963*	*1983*
Deforestado/agrícola	1130	692	151	12
Humedales	59	59	59	59
Bosque secundario joven	902	1196	1360	1335
Bosque de dosel tupido	127	322	692	855
Zonas recreativas	0	6	13	34
Plantaciones	0	811	662	692
Total	2219	3087	2936	2988

La Franja Kárstica Ha Sido Usada Intensamente

Durante la primera mitad del siglo XX, predominaron los usos agrícolas de las tierras de la región caliza de Puerto Rico. Luego de que comenzara a menguar la actividad agrícola en la década de 1950, ocurren cambios fundamentales y acelerados en el uso de los terrenos y la cubierta terrestre. El Bosque Estatal de Río Abajo representa un estudio de caso para toda la franja kárstica (tabla 17). En 1936, el área de terrenos deforestados y agrícolas llegó a su máxima extensión, para el 1950 y el 1963 había disminuido marcadamente y para el 1983 casi había desaparecido. A la misma vez, el área del bosque secundario y de dosel cerrado aumentó rápidamente. Entre 1936 y 1950, se sembraron rodales para la producción maderera y las áreas recreativas han aumentado desde la década de 1950. El área de humedales no han variado durante todo este periodo.

La figura 5 muestra la cubierta terrestre para toda la región caliza entre 1977 a 1978. Para esa época, el paisaje general de Puerto Rico sufría una transición de los usos primordialmente agrícolas a usos mixtos incluían pastizales, bosques y usos urbanos (Ramos y Lugo 1994). Aún cuando el pasto fuera el tipo dominante de cubierta en la Isla, en la región caliza predominaba la cubierta forestal (tabla 2). La cubierta forestal densa era de 31 por ciento en la región caliza. La caliza del Sur tenía un 57 por ciento de cubierta forestal densa y la franja kárstica tenía un 42 por ciento de cubierta forestal densa. Si se combina toda la cubierta forestal y de matorral, la cubierta en la región caliza, la franja kárstica y la caliza del Sur fue de 40, 49, y 78 por ciento, respectivamente (tabla 2). Para la isla en su conjunto, la cubierta forestal alcanzaba aproximadamente un 30 por ciento en la década del 1980 (Birdsey y Weaver 1982).

El terreno desarrollado cubría un 16 por ciento de la región caliza en 1977 y 1978 y llegó a un 6.7 por ciento en la caliza del Sur y a un 11 por ciento en la franja kárstica (tabla 2). La cubierta urbana en 1994 en la región caliza era de un 19 por ciento (foto 60), un 13.5 por ciento en la franja kárstica y un 10.4 por ciento en la caliza del Sur (tabla 2). Para propósitos de comparación, para el 1994 el área urbanizada había aumentado en toda la isla un 27.4 por ciento, de un valor en 1977 de 11.3 por ciento (984 km^2) a un valor de 14.4 por ciento en 1994, es decir, 1252 km^2 (López y otros 2001). El aumento en la cubierta urbanizada fue más acelerado en la isla en su totalidad que en la región caliza. Sin embargo, una proporción mayor de la región caliza era urbana. Esto se debe a la presencia de la zona metropolitana de San Juan y otros centros urbanos en la costa norte. La cubierta urbana en la región caliza del Sur aumentó a un paso más acelerado que la cubierta urbana en toda la Isla. La franja kárstica sufrió la tasa menos acelerada en el crecimiento de la cubierta urbana. La mayor parte de la cubierta urbana de la franja kárstica y la caliza del Sur corresponde a las planicies costeras.

Foto 60. Desparramamiento urbano en la zona caliza costera del norte. Foto de J. Colón.

La Franja Kárstica Es Vulnerable a la Actividad Humana

"Todas las soluciones a los problemas de ingeniería de cimientos en el karso son costosas."

"Los [embalses] construidos en el karso han presentado una espantosa falta de capacidad para almacenar el agua".
White (1988, págs. 362, 369).

La roca caliza presenta por lo menos tres problemas para los proyectos de construcción: compactación diferencial debido a la

Foto 61. Actividades de mantenimiento en la carretera PR 10. La carretera se había inaugurado oficialmente al momento de tomar esta foto. Los constantes derrumbes auguran que este nivel de mantenimiento nunca se aminorará en este segmento de carretera. Foto de L. Miranda Castro.

Foto 62. La transformación de la franja kárstica durante la construcción de la carretera PR 10 a través del Bosque Estatal de Río Abajo. La sección de la carretera que se aprecia en el primer plano se considera como una de las construcciones viales más costosas por kilómetro del mundo. Foto de J. Colón.

Foto 63. Humedal en restauración en la zona caliza del norte. Foto de L. Miranda Castro.

irregularidad del lecho rocoso, la **sufosión** y el colapso de las cavidades subterráneas. Como resultado de ésto, los requisitos de ingeniería para la construcción y mantenimiento de estructuras en la franja kárstica son sumamente costosos (foto 61). No obstante, la actividad humana en la franja kárstica siempre ha efectuado cambios en los ecosistemas y el carácter de la zona, pero nunca de manera tan fundamental como ahora. Actualmente, la región es vulnerable a los daños irreversibles causados por los cambios de gran envergadura en la manera en que la gente utiliza el entorno del karso. Las funciones y servicios de la franja kárstica se ven amenazadas por la actividad humana, lo cual a su vez amenaza la sustentabilidad de las futuras actividades humanas. Por ejemplo, el USGS identificó el uso de los terrenos como la causa principal de la degradación de la calidad del agua subterránea (Zack y otros 1986). Específicamente, identificaron la disposición de desechos industriales y los derrames accidentales, los vertederos municipales, la aplicación de plaguicidas agrícolas, la extracción de agua a gran escala para los centros urbanos y riego y los desechos de la crianza de animales o el drenaje de los pozos sépticos. Si se permite que la calidad del agua subterránea se deteriore, la Isla podría perder más de un 20 por ciento de su abasto de agua dulce. A modo de ilustración, contrastamos la naturaleza y la intensidad de cambios antropogénicos, del pasado y del presente, en la franja kárstica.

¿Cortar o pavimentar los bosques?

Los usos tradicionales del bosque requieren el desmonte para elaborar madera para la construcción, carbón, estacas y muchos otros propósitos. A veces los bosques se transforman para otros usos, como para la agricultura o tierras construidas. Estas conversiones se han documentado y descrito en la sección anterior con respecto a la franja kárstica. Afortunadamente, los bosques tienen la capacidad de recuperarse en los terrenos agrícolas abandonados o donde hubo construcción de baja intensidad, ya sea naturalmente o por la reforestación (Álvarez Ruiz y otros 1997, Rivera 1998, Rivera y Aide 1998). Actualmente, no sólo se usan poderosas máquinas para remover bosques, sino que también se remueve el substrato donde crecen los árboles (foto 62). Los seres humanos transforman rápidamente el paisaje del karso, removiendo mogotes, rellenando sumideros y cavidades, rellenando humedales y, en general, pavimentando las superficies para facilitar el uso intensivo del terreno. Bajo estas condiciones, la rehabilitación de los terrenos de los bosques o de la topografía original es sumamente costosa y difícil, y quizás hasta imposible.

¿Drenar o rellenar los humedales?

En el pasado, los humedales se drenaban para uso agrícola, por ejemplo el drenaje del caño Tiburones (Zack y Class Cacho 1984). Estos proyectos de drenaje eran reversibles porque las condiciones hidrológicas se podían revertir (foto 63). Tanto el caño Tiburones, en la caliza del Norte, como la laguna de Guánica, de la caliza del Sur, se drenaron para uso agrícola, y en la actualidad se están restaurando con propósitos de conservación. Hoy día, sin embargo, los humedales simplemente se rellenan con materiales de los mogotes, lo cual elimina el humedal y dificulta grandemente su restauración. Los manglares rellenados en la región de Camuy han resultado en quiebras económicas cuando los tribunales han ordenado que se removiera el relleno. A pesar de las órdenes judiciales, los manglares permanecen sepultados debajo de varios metros de material de relleno.

¿Convertir o transformar los usos de los suelos?

El ser humano siempre ha transformado al paisaje para adaptarlo a sus necesidades.

Foto 64. Maquinaria operando cerca de la carretera PR 22, km 39.2, destruye dos cavidades. Foto de L. Miranda Castro.

Los bosques se convierten en terrenos agrícolas y pastos, los pastos y los terrenos agrícolas se convierten en tierras urbanas o construidas y así sucesivamente. En la franja kárstica, los retos de las formaciones geológicas particulares restringieron en un principio las actividades de transformación a las zonas llanas y los valles del accidentado paisaje del karso, fuera de conos, de torres o de dolinas. Hoy día, sin embargo, la geología y la topografía no representan retos para la maquinaria moderna y la franja kárstica está siendo transformada (foto 64). La maquinaria moderna permite la extracción de mogotes de manera que se pueda aplanar el terreno y rellenar los humedales. Las carreteras se diseñan para atravesar la región en líneas rectas, en contraste con las carreteras con curvas del pasado (recuadro 14). Los sumideros y las cavidades se rellenan con hormigón o relleno que se obtiene de los mogotes. Los meandros de los ríos se capturan en canales rectos de concreto o se convierten en lagos mediante la construcción de represas. En el caño Tiburones, el nivel freático bajó varios metros debido al bombeo continuo hacia el océano y la construcción de estructuras para contener el agua (Zack y Class Cacho 1984).

¿Bombeo o sobreexplotación de los acuíferos?

En tiempos pasados, el bombeo en la caliza del Norte le permitía a la gente aprovechar el vasto acuífero. Actualmente, sin embargo, las bombas son tan poderosas y se utilizan de manera tan indiscriminada que el resultado es la sobreexplotación de los acuíferos – reduciendo así la superficie potenciométrica a niveles cada vez más y más bajos. Entre 1970 y 1989, los niveles del acuífero artesiano disminuyeron tanto como 49 m cerca de la costa, donde se concentra la extracción industrial y un promedio de 23 m en el acuífero no confinado, tierra adentro del complejo industrial (Gómez Gómez 1991). La sobreexplotación de los acuíferos costeros resulta en la intrusión salina. La intrusión del agua de mar en el acuífero ha sido motivo de preocupación en Puerto Rico desde fechas tan tempranas como el 1947 (McGuiness 1963).

La salinización inutiliza el acuífero para el uso humano. El USGS ha documentado la salinización en varias partes del acuífero superior de la costa norte (Zack y otros 1986). El resultado de esta salinización es que el interfaz entre el agua de mar y el agua dulce se ha movido tierra adentro, afectando la calidad del abasto de agua subterránea utilizada para consumo por la población en los pozos cercanos a la costa. Durante los periodos de bombeo intensivo, estos pozos extraen agua de mar y se inutilizan.

En numerosos estudios se ha demostrado la vulnerabilidad de la caliza de la costa norte a la salinización como resultado del bombeo excesivo de los pozos (Gómez Gómez 1984, Gómez Gómez y Torres Sierra 1988, Quiñones Aponte 1986, Torres González 1985, Torres González y Díaz 1984). En el río Grande de Manatí, se puede encontrar agua de mar en cualquier punto del valle, lo cual limita el desarrollo futuro de agua al sur de la carretera PR 2 (Gómez Gómez 1984). Los pozos en la zona que se extiende desde Vega Baja hasta Sabana Seca han experimentado una disminución en el nivel del agua de unos 2.1 m en un periodo de 8 años (Torres González y Díaz 1984). Torres González y Díaz (1984) atribuyen esta disminución al bombeo excesivo. La creciente huella urbana, que cubre las áreas de recarga del agua subterránea con relleno u hormigón, reduce la recarga de agua dulce del acuífero, agravando aún más la situación. Hay

procedimientos para impedir la salinización del acuífero; por ejemplo, Torres González (1985) calculó la tasa máxima de bombeo con la cual se podía evitar la salinización en la zona de Barceloneta. Los pozos podrían producir un máximo de 6 mgd (0.263 m^3/s) y el bombeo a una tasa mayor bajaría el nivel del agua y fomentaría la salinización.

¿Contaminación o envenenamiento del agua subterránea?

Debido al alto grado de permeabilidad, el acuífero de la costa norte es muy vulnerable a la contaminación. Su alta permeabilidad favorece la extracción del agua de los pozos; sin embargo, también favorece el desplazamiento lateral de los contaminantes que pudieran entrar al sistema (Giusti y Bennett 1976). En el pasado, los seres humanos contaminaban el agua superficial y subterránea, pero la actividad humana en la región era de baja intensidad. Todo uso del agua añade sustancias y reduce el volumen de agua, con el resultado neto de la contaminación química. Tradicionalmente, la escorrentía de los sistemas agrícolas y urbanos, contaminaba el agua con materia orgánica, nutrientes y sedimentos. Este tipo de contaminación continúa en la región caliza; como por ejemplo, la contaminación por nitratos de la escorrentía agrícola y de los vertederos legales e ilegales (foto 65), ganaderías y descargas de pozos sépticos en la zona Manatí - Vega Baja (Conde Costas y Gómez Gómez 1999). La concentración de nitratos en las aguas del acuífero superior de la región en la laguna Tortuguero excede los límites seguros de 10 mg/L establecidos por el Departamento de Salud de Puerto Rico. Varios pozos usados como abasto de agua para el público se han tenido que cerrar debido a la contaminación con nitratos. Estos cierres representan una pérdida de producción de agua con una magnitud de unos 5,800 m^3/d.

Hoy día, se utilizan productos químicos poderosos y peligrosos en el ámbito doméstico y en el ámbito industrial y éstos se deben añadir a los contaminantes tradicionales a la hora de evaluar la calidad de agua. A medida que estos nuevos productos químicos lleguen al agua superficial y subterránea, el nivel de contaminación pasa de una mera contaminación al envenenamiento. Estos productos químicos surgen de los plaguicidas usados en la agricultura y los productos químicos exóticos usados en distintos procesos farmacéuticos y de manufactura. Aunque actualmente se prohibe su inyección al acuífero, los ejemplos de materiales que se han inyectado en los pozos de disposicion de desechos en ambos acuíferos de la costa norte incluyen aguas sanitarias, aceite, ácido neutralizado, compuestos orgánicos, tintes, soluciones de sulfatos, desechos de la planta procesadora de piñas y desechos de cervecerías. El USGS documentó la presencia de estos tóxicos en el acuífero de la costa norte. Guzmán Ríos y Quiñones Márquez (1985) encontraron que estaba muy difundida la contaminación del agua subterránea con compuestos orgánicos sintéticos volátiles que menoscaban la calidad del abasto de agua para el consumo humano. Para el 1986, la Agencia Federal de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) había otorgado permisos a 362 generadores de desechos peligrosos: 8 de éstos se habían incluido en la Lista Nacional de Lugares Prioritarios de Desechos Tóxicos, los llamados lugares de Superfondo (Zack y otros 1986). Estos lugares se encuentran en los municipios de San Juan, Arecibo y Manatí en la zona kárstica del Norte; y en

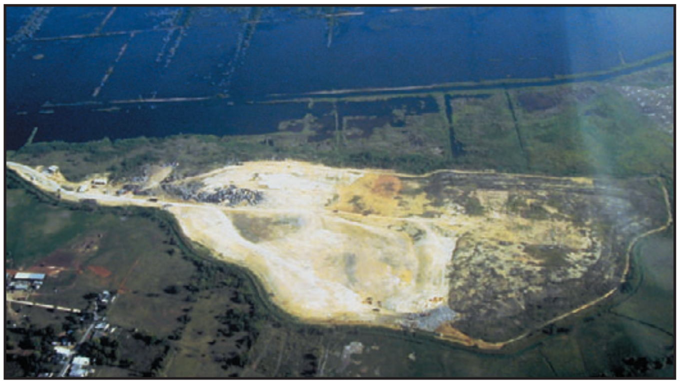

Foto 65. El vertedero de Arecibo. Obsérvese su cercanía a los humedales costeros. Foto de J. Colón.

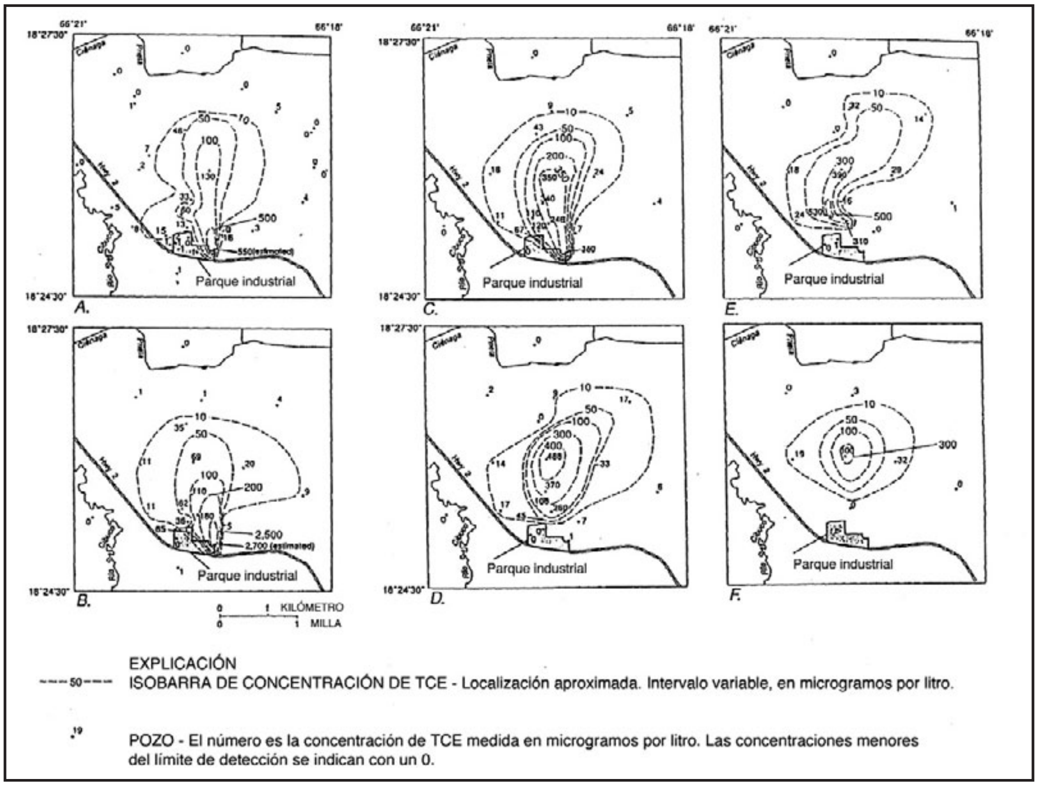

Figura 31. Extensión aproximada del penacho de tricloretileno (TCE) en el acuífero freático de Vega Baja. Se muestran penachos para las elevaciones de (a) -3.0 m, (b) -3 a -22.9 m, (c) -22.9 a -38.1 m, (d) -38.1 a -53.2 m, (e) -53.2 a -68.6 m, y (f) -68.6 a -86.0 m en el acuífero. Las líneas representan una concentración pareja de TCE (Sepúlveda 1999).

con materiales peligrosos se describieron en un estudio del acuífero freático de Vega Alta, el cual fue contaminado con compuestos orgánicos volátiles (Sepúlveda 1999). Se detectó la contaminación del acuífero por primera ven en 1983 cuando se encontró que 17 de los 90 pozos examinados en Puerto Rico tenían compuestos orgánicos extractables de cloruro metílico (Guzmán Ríos y Quiñones Márquez 1985). Uno de los pozos de Vega Alta tenía una concentración particularmente alta de tricloretileno y tetracloretileno, dos compuestos volátiles halogenados que se usan como solventes de aceite en las industrias metalúrgicas y electrónicas, así como en las plantas de lavado en seco de ropa. Se consideró que el vertedero de Vega Alta y un parque industrial eran las posibles fuentes de estos contaminantes. En 1990 y 1992, se calculó que el acuífero contenía 5.9 Mg y 5.8 Mg de tricloretileno, respectivamente (figura 31). Se calculó que la infiltración de solutos al acuífero era de 10 kg/año, teniendo en cuenta las tasas de recarga neta a largo plazo. Las proyecciones que se hicieron de varias actividades de remediación resultaron en estimados de 1.7 a 2.6 Mg en solutos, dependiendo del tipo de actividad de remediación, que permanecerían todavía en el acuífero para el año 2022. Las actividades remediativas eran menos eficaces en las capas más profundas del acuífero donde los gradiantes hidráulicos eran menores que en los estratos de menor profundidad.

Contaminación del Agua de la Superficie

La falta de tratamiento de las aguas sanitarias, sumada a la descarga de contaminantes de fuentes precisas y de fuentes dispersas en las aguas superficiales, causa problemas de contaminación del agua en todo Puerto Rico. En el karso, ésto se ilustra con los conteos de coliformes fecales y bacteria de estreptococo fecal en las aguas del río Grande de Arecibo y del río Tanamá (Quiñones Aponte 1986). Los valores exceden los estándares de la EPA y tienden a aumentar cuando hay grandes eventos de escorrentía, particularmente durante el mes de mayo. Las aguas del río Cibuco, el río de La Plata y el río Grande

de Manatí experimentan las mismas tendencias en cuanto a su calidad (Torres González y Díaz 1984, Gómez Gómez 1984). Se han registrado hasta 200,000 colonias de coliformes fecales por 100 mL en el río Grande de Manatí. Los embalses, que regulan el caudal de los ríos, probablemente han disminuido la cantidad de sedimentos suspendidos en estos ríos (Torres González y Díaz 1984).

La Franja Kárstica Es de Importancia Vital para Puerto Rico y Tiene que Conservarse

"Como paisajes susceptibles a la modificación y adaptación a los fines humanos, los terrenos kársticos presentan grandes retos. Como paisajes que ofrecen intensas experiencias de satisfacción humana, los terrenos kársticos tienen un gran valor. El problema sin resolver...es cómo equilibrar el enfoque esencialmente económico al uso y desarrollo del terreno con el acercamiento esencialmente no económico de las experiencias que ofrecen los paisajes silvestres."

White (1988, p. 379).

Importancia de la Franja Kárstica

La franja kárstica de Puerto Rico no sólo representa una parte importante del territorio de la Isla, sino que es una zona de particular importancia en cuanto a sus recursos ambientales (recuadro 15). Los paisajes y los contrastes ambientales de la franja kárstica son espectaculares, con su extensa variedad de formaciones subterráneas y superficiales. Los sistemas ecológicos de la franja kárstica son diversos, reflejo de la gama de condiciones climáticas: bosques que van desde secos a muy húmedos, ambientes fisiográficos que van desde estuarios costeros hasta montanos así como de la variedad fisonómica - bosques, humedales, sistemas acuáticos y sistemas antropogénicos. Los sistemas hidrológicos del karso están dominados por un gran sistema de acuíferos que diariamente descarga millones de galones de agua en la zona costera.

La zona caliza del Norte de Puerto Rico también contiene recursos naturales de gran valor. El acuífero representa uno de los abastos de agua dulce de mayor tamaño de la Isla. Las dunas de arena en la costa han provisto grandes cantidades de arena para la industria de la construcción de Puerto Rico. Los estuarios fluviales sostuvieron la población de peces marinos y estuarinos, además de crustáceos. La época de migración del maravilloso Setí en los ríos como el río Grande de Manatí y el río Grande de Arecibo se celebra con festivales de pueblo. Estas subidas representan la migración de millones de peces en etapa post-larval de la especie *Sicydium plumieri* de la familia Gobiidae (pez olivo), que suben río arriba desde el mar entre julio y enero, y sirven de alimento para el ser humano y los animales silvestres (Erdman 1961). Los depósitos calizos son una fuente importante de relleno para actividades de construcción y agricultura. Las numerosas canteras de la región aprovechan las arenas silíceas y otros productos de pureza química de las formaciones calizas.

Biológicamente, la franja kárstica posee una gran riqueza de especies de plantas y animales. Casi la totalidad de registros fósiles de flora y fauna extinta en Puerto Rico proviene de esta región. En toda la región se encuentran especies raras y endémicas. En la franja kárstica se refugian especies que se encuentran en la Lista Federal de Especies en Peligro de Extinción. La restauración de las poblaciones en peligro de extinción parece factible en esta región, la cual posee extensiones de zona silvestre de tamaño inusual para una isla conocida por el predominio de zonas urbanizadas y construidas. La protección de un hábitat tan importante en la franja kárstica - en algunos casos, el único hábitat - para 34 especies conocidas como amenazadas y en peligro de extinción, podría llevar a bajarlas de categoría y al cabo del tiempo, removerlas de la lista federal de especies en peligro de extinción. La

Recuadro 15. Recursos ambientales de la región del karso.

El sesenta y cuatro por ciento del área de acuífero de Puerto Rico se extiende por la zona caliza del norte. Este acuífero descarga unos 0.45 Mm^3/d (120 mgd), de los cuales 0.20 Mm^3/d (52 mgd) se consumen. La franja kárstica también contiene:

- El río más largo, el río de La Plata
- El único río que forma una delta, el río Grande de Arecibo
- La descarga fluvial de mayor tamaño, el río Grande de Arecibo
- La menor densidad de drenaje superficial
- Los estuarios fluviales de mayor tamaño
- Los humedales costeros de mayor extensión
- Los únicos ríos subterráneos de la isla
- Las cuevas y sistemas de cavernas más grandes
- Las dunas de arena más grandes
- Una formación terrestre única en el mundo: los zanjones
- La mayor riqueza de especies arbóreas por unidad de área
- Más de 220 especies de aves
- Dieciséis de las 17 aves endémicas a la isla
- Treinta y cuatro especies en peligro de extinción: 10 aves, 1 reptil, 1 sapo, 22 plantas
- Dos especies de plantas y nueve especies de aves denominadas como vulnerables
- Las únicas poblaciones del Sapo Concho, una especie en peligro de extinción, y de dos reptiles vulnerables
- Playas de anidaje para tres tortugas marinas en peligro de extinción
- Más de 110 especies de aves migratorias, por lo menos 11 de las cuales anidan ahí
- Más de 90 especies de peces asociados con los cuerpos de agua de la zona
- Los yacimientos de fósiles más importantes tanto con respecto a la paleobotánica como a la paleofauna
- Los únicos yacimientos paleontológicos en la isla
- Paisajes espectaculares
- Una verdadera zona silvestre

Recuadro 16. Colección de eventos y datos curiosos del karso.

Monroe (1976) informa que durante el huracán San Felipe en 1928, bajaron tantos troncos por el río Camuy que se formó un gigantesco atascamiento a la entrada de Hoyo Azul, obstruyendo el flujo del río y causando que el agua se acumulara un kilómetro hacia atrás e inundara la carretera PR 129, hoy la carretera PR 134. Al día de hoy, todavía se encuentran en las cuevas del río Camuy algunos troncos que se originaron en este suceso y la entrada llamada Hoyo Azul todavía está obstruida con troncos, impidiéndo su uso como entrada.

La **Subsidencia** puede ocurrir en regiones kársticas profundas con materiales no calcáreos suprayacentes, tales como depósitos costeros, depósitos aluviales o depósitos de manto, que pueden llevar a la lixiviación, disolviendo la caliza y causando la subsidencia.

Los depósitos aluviales pueden cubrir la caliza con capas gruesas de aluvión. Los valles coalescentes pueden cubrir casi toda la caliza y las formaciones calizas subyacentes solamente se evidencian con la presencia de una que otra loma. Las cavidades grandes también se pueden rellenar de aluvión.

Gran parte de la arena de playa de Puerto Rico contiene fragmentos de caracoles. Esta arena se cementa y crea la roca de playa, que es una calcarenita de textura gruesa. La cementación puede relacionarse con la precipitación del carbonato de calcio cuando los caracoles están expuestos a aguas ácidas.

La Quebrada de los Cedros en Moca tiene una represa de hormigón que se construyó con propósitos de riego agrícola, en contra del consejo de geólogos. Debido a que es un valle seco, la represa nunca ha retenido agua, ni siquiera durante los aguaceros fuertes.

Las personas construyen sus casas en los paisajes de dolina, para luego verlas derrumbarse en las depresiones colapsadas. Además, se usan estas depresiones para depositar basura, así como las cuevas verticales. Wegrzyn y otros (1984) han documentado ejemplos, como el pozo de drenaje que se ubicó a la entrada de la empresa H.R. Robins Pharmaceutical en el km 63 de la carretera PR 2. Entre el 13 y el 15 de diciembre de 1981, una tormenta de 740 mm llenó el pozo a capacidad. En 45 segundos, 5,500 m^3 (1.2 millones de galones) de agua se drenaron en el suelo con un ruido ensordecedor, a la vez que se abrieron cuatro sumideros (uno de ellos con un diámetro de 12 m) en el fondo del pozo (Wegrzyn y otros 1984).

región provee espacios abiertos de gran calidad para el esparcimiento y el turismo, además de extensos ríos superficiales y subterráneos con excelente calidad de agua.

Los asentamientos humanos representan problemas para la región (recuadro 16). La topografía de la franja kárstica es muy accidentada, los suelos no son aptos para el cultivo, y la construcción en las formaciones kársticas es particularmente peligrosa, muy costosa y requiere altos niveles de mantenimiento frecuente. Los asentamientos urbanos tradicionales se han ubicado fuera de la franja kárstica, por lo regular en los llanos con arenas de manto y suelos aluviales. La franja kárstica es una zona de Puerto Rico en la cual la gente puede encontrar espacio para el esparcimiento y los recursos naturales para sostener y mejorar su calidad de vida. Es una zona cuyo mejor uso es la conservación de sus recursos naturales, de manera que la población densa fuera de la franja kárstica se pueda beneficiar del uso y los servicios que ofrecen sus recursos naturales.

La perspectiva de la franja kárstica como fuente de productos y servicios para el resto de Puerto Rico ya se ha comprobado en la construcción del llamado superacueducto, en el cual se transporta agua desde la región kárstica del Norte hasta la zona metropolitana de San Juan. Otro ejemplo sería el uso de la región para el esparcimiento y el turismo, utilizando los terrenos públicos como destino para excursionistas y turistas. Otros ejemplos de lugares dentro del karso que atraen visitantes de la Isla y del mundo entero son: El Parque de las Cavernas del Río Camuy (foto 66), el Bosque

Foto 66. Parque Nacional de las Cavernas de Camuy. Foto de A.E. Lugo.

Estatal de Río Abajo, el Bosque Estatal de Guajataca, los estuarios del río Grande de Manatí y del río Grande de Arecibo, la laguna Tortugero, el caño Tiburones y los ríos Encantado, Camuy y Tanamá.

Conservación de la Franja Kárstica

La conservación de la franja kárstica es necesaria por varias razones:

- su biodiversidad (foto 67),
- la recuperación de especies en peligro de extinción,
- su naturaleza de vida silvestre y de paisajes espectaculares (foto 68),
- las oportunidades científicas y educativas que ofrece la región (foto 69),
- su potencial como área abierta para el esparcimiento y la recreación, y
- sus múltiples funciones ambientales, tales como el extenso abasto de agua dulce para los sistemas naturales y humanos, la absorción de cantidades razonables de desperdicios y el efecto amortiguador para los humanos con respecto a las perturbaciones ambientales (foto 70).

También existen razones poderosas, relacionadas con la conservación de nuestra propia especie, para conservar todas las regiones kársticas, y de hecho, todos los recursos naturales (recuadro 17). Sin embargo, existen tres razones principales para conservar la

Foto 67. Salamanquita (*Sphaerodactylus macrolepis*). Foto de J. Colón.

Foto 68. Mogote escarpado en Ciales, Puerto Rico. Foto de L. Miranda Castro.

Foto 69. Participantes de una actividad educativa en la Laguna Tortuguero, Vega Baja, Puerto Rico. Foto de L. Miranda Castro.

Foto 70. Joven consume agua pura de la franja kárstica. Foto de L. Miranda Castro.

Recuadro 17. ¿Por qué conservar?

Los recursos ambientales de la franja kárstica son el resultado del entretejido de factores bióticos y abióticos, de compleja interconexión e interrelación, y el producto de eones de evolución geológica y biológica.

La forma en que las actividades humanas han ido destruyendo el karso puertorriqueño hace que sea casi imposible restaurar lo que tomó a la naturaleza millones de años en desarrollar. Sin darnos cuenta, estamos destruyendo nuestro sistema de apoyo vital. La destrucción de las dunas de arena, los humedales, las cuevas y cavernas, las formaciones únicas y los estuarios riberinos—realizada en nombre del desarrollo humano a corto plazo—acaba por dejarnos amenazados a largo plazo debido a que estamos creando problemas ambientales con consecuencias conocidas.

En este viaje humano hacia el futuro, hemos decidido cuáles especies sobrevivirán, sentenciando a la extinción a muchas especies sin darnos cuenta que esa misma extinción es un aviso premonitorio y urgente a los seres humanos de lo que nos sucederá si no conservamos el karso y el resto de la Isla.

En resumen, la conservación es algo vital; es la mejor manera de utilizar los recursos que:

- conservarán los logros alcanzados,
- nos permitirá conservar un patrimonio natural y público,
- nos protegerá de los sucesos catastróficos de la naturaleza,
- garantizará un abasto adecuado de aire y agua de calidad,
- reducirá los costos de desarrollo y
- mejorará la calidad de vida.

franja kárstica: su singularidad, su valor y su condición vulnerable.

No hay una zona kárstica tropical en todos los Estados Unidos que se pueda comparar con la de Puerto Rico. En ninguna parte del mundo se encuentran paisajes de zanjones a una corta distancia del karso de torre, karso de conos, karso de dolinas y sistemas de ríos subterráneos y cavidades de clase mundial, tales como el río Encantado y el río Camuy. La franja kárstica de Puerto Rico es sencillamente un lugar único en el mundo y se debe conservar.

El valor de la zona kárstica del Norte es incalculable. Solo su capacidad de producción de agua la hace una de las regiones más ricas del Caribe. La sustentabilidad del desarrollo económico en Puerto Rico y la calidad de vida para las futuras generaciones de puertorriqueños y puertorriqueñas se asegurará si se protegen los abastos de agua de la franja kárstica. La conservación del bosque natural que actualmente cubre la franja kárstica y de la formación silvestre subterránea es una manera certera de lograr esta meta.

La conservación de la franja kárstica de Puerto Rico exige acción. Hemos demostrado que las tendencias actuales de uso de los terrenos de esta región exponen el karso a daños irreparables. La conservación no significa preservar la región y prohibir la actividad humana. Muchas de las actividades deseables de las personas pueden continuar, pero deben dirigirse y organizarse de una manera que minimice el daño irreversible al karso (recuadro 18). Algunas actividades, como la remoción descontrolada de mogotes de la zona, serían inaceptables. La conservación es el único enfoque disponible para equilibrar el desarrollo económico con la experiencia de la zona silvestre.

Recuadro 18. Desarrollo alterno para Puerto Rico y la franja kárstica

La actividad humana debe organizarse para reconocer la huella ecológica humana. Para que las generaciones venideras puedan satisfacer sus necesidades, se requiere que efectuemos cambios hoy. La calidad de vida de la gente sólo se puede mantener si la biosfera, de la cual Puerto Rico forma parte, puede satisfacer sus necesidades sin erosionarse. Tenemos que reconocer que hoy por hoy vivimos en una isla con más consumo, más desechos, más gente, pero con menos agua dulce disponible, menos suelo, menos terrenos agrícolas, que en cualquier momento de nuestra historia. Actualmente, la biodiversidad de la Isla es distinta a la de antaño. El sistema internacionalmente aceptado de contabilidad nacional calcula el producto nacional bruto (PNB) pero no toma en cuenta la depreciación del capital natural, tales como la pérdida de suelo, la destrucción de los bosques y la pérdida de muchos otros servicios provistos por la biosfera. Por lo tanto, el uso del PNB exagera el progreso y al no reflejar la realidad, genera políticas económicas destructivas. Una economía en crecimiento que se fundamenta en un sistema de contabilidad incompleto poco a poco se socava ella misma y acaba por colapsarse debido a la destrucción de sus sistemas internos de apoyo.

En vista de la particular composición geológica y debido a que la zona norte contiene el mayor acuífero de agua dulce en la Isla, el cual ya está parcialmente contaminado, se hace imprescindible planificar la actividad humana en la franja kárstica con sumo cuidado.

El agua dulce es una necesidad vital para la supervivencia de todos los seres vivos, incluyendo los seres humanos. Por lo tanto, es imperativo frenar toda actividad que pueda seguir amenazando la calidad y cantidad del agua en el acuífero. La contaminación del acuífero, como se ha explicado en este documento, es muy difícil o imposible de limpiar, y donde sea factible, puede tomar décadas.

El desarrollo de escenarios futuros para la franja kárstica requiere que se restrinja el desparramamiento urbano y que los centros urbanos existentes crezcan verticalmente para reducir la demanda por el terreno. En ciudades como Curitiba en Brasil y Portland, Oregon, los servicios se ofrecen con mayor eficiencia y a un costo más bajo, y la transportación colectiva es una alternativa necesaria. La calidad de vida en estas ciudades ha mejorado y ambas gozan de economías dinámicas basadas en una utilización menor per capita de los recursos naturales y en la reducción de desperdicios. Puerto Rico no se merece menos.

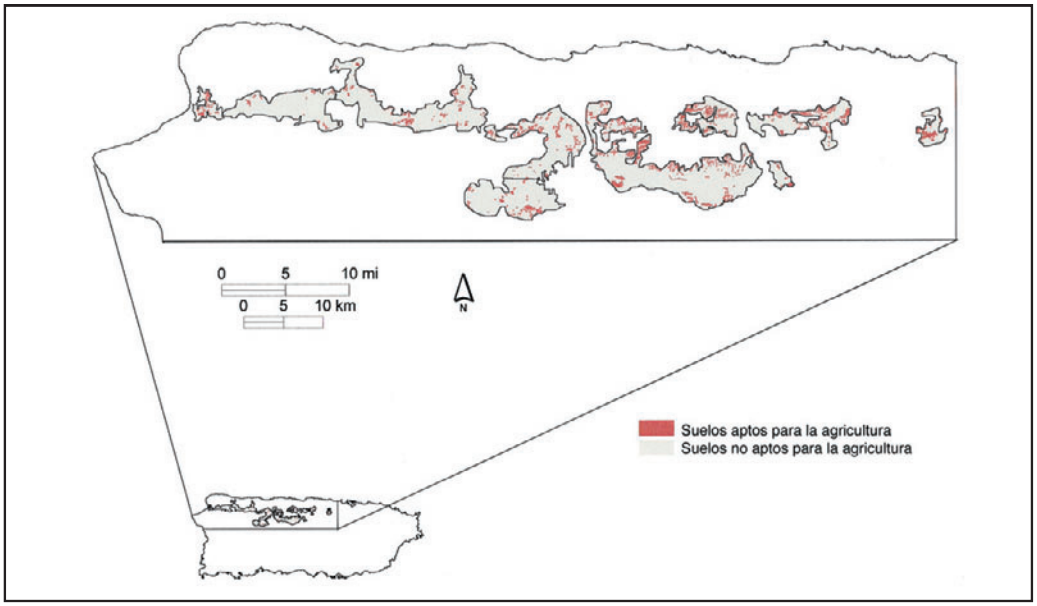

Figura 32. Mapa de los tipos de suelo en la franja del karso que se propone sean trasladados al dominio público.

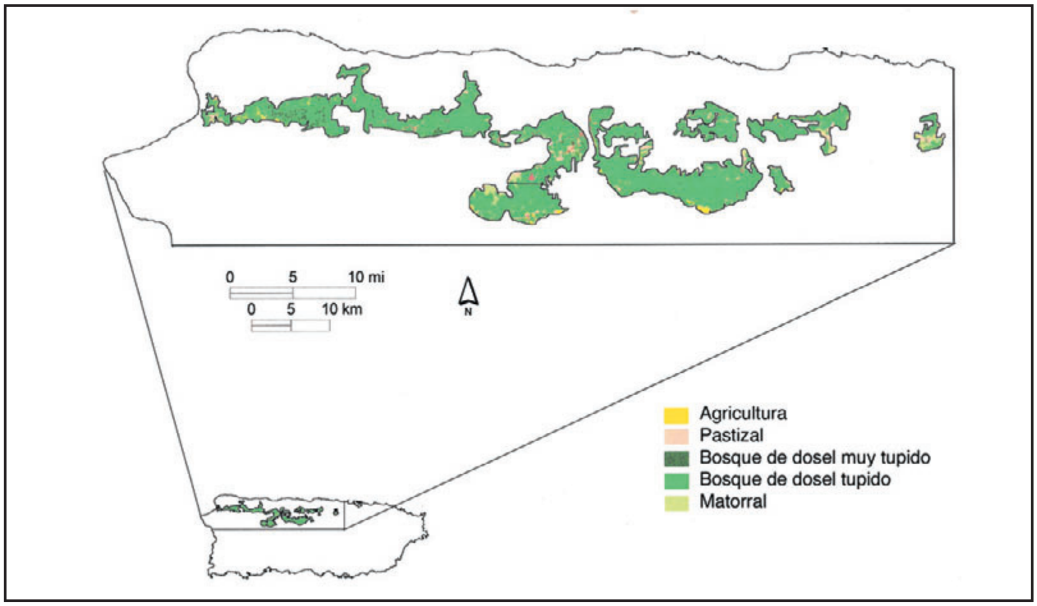

Figura 33. Mapa de los tipos de cubierta terrestre en la zona de la franja kárstica que se propone sea trasladado al dominio público.

Propuesta para el Traspaso de Parte de la Franja Kárstica al Dominio Público

Abogamos por una ética de conservación para todos los usos de terrenos en Puerto Rico, que incluyen los de la región caliza. Además, abogamos porque una mayor parte de los terrenos de la Isla se dediquen a la conservación. La ventaja de las zonas de conservación natural es que proveen zonas de amortiguamiento y servicios ecológicos para las zonas de uso más intenso. La presencia de murciélagos en las cavidades de la franja kárstica, por ejemplo, aportaron a la reforestación acelerada de los terrenos agrícolas abandonados de Puerto Rico. Las zonas conservadas del karso pueden aportar de manera significativa a la sustentabilidad de los terrenos desarrollados de Puerto Rico.

Proponemos que se proteja la cubierta forestal de la franja kárstica bajo el dominio público. Esto asegurará la protección de las zonas de recarga importantes del acuífero de la costa norte y, por consiguiente, del abasto de agua de este acuífero. El agua del acuífero a su vez conservará los humedales costeros, los caudales de los ríos y las quebradas y los abastos de agua que sostiene la actividad humana. Como beneficio adicional, se conservará la biodiversidad, se protegerán las especies endémicas y en peligro de extinción y se proveerá espacio abierto natural para la población cada vez mayor de la Isla.

Esta propuesta no resta nada del uso actual significativo de estos terrenos. Las partes accidentadas de la franja kárstica no tienen suelos utilizables para la agricultura comercial (figura 32) ni espacio apto para la construcción de casas o infraestructura vial. De hecho, estos usos son escasos en la región. A pesar de todo el crecimiento y desparramamiento urbano en Puerto Rico, esta parte de la isla ha retenido su cubierta forestal y ha probado que éste es el uso más sensato de la región. Los usos de la región incluirían la producción y la protección de agua dulce, las zonas silvestres, la restauración de poblaciones silvestres, la conservación de la biodiversidad, la recreación pasiva, el turismo ecológico, los productos y servicios forestales, la educación y la investigación. La investigación en la región del karso es pertinente tanto para su propia conservación como para atender los problemas en las regiones kársticas de los Estados Unidos (Peck y otros 1988) y el resto del

mundo (White 1988).

Proponemos que se adquiera parte de la franja kárstica (figura 33) y se traspase al dominio público. Esta propuesta se concentra en una parte del karso, de un área de 39,064 ha, principalmente de las calizas Aguada y Lares. Actualmente, esta región carece virtualmente de habitantes (sólo el 1.5 por ciento del terreno se había desarrollado en 1994, tabla 2) pero tiene una cubierta forestal continua (el 86 por ciento) en suelos que no son aptos para usos agrícolas u otros usos económicos (figura 32). De los mapas de suelos (Gierbolini 1975, Acevedo 1982) se desprende que el 92 por ciento de estos terrenos se clasifican como de capacidad VII. Son suelos y zonas misceláneas de graves limitaciones debido a su potencial erosivo, poca calidad o exceso de humedad, lo que significa que no son aptos para el cultivo (tablas 2 y 16).

Refiriéndose a los suelos de la asociación San Sebastián, que se extiende por más de 24,282 ha en la región kárstica del Norte, Gierbolini (1975) escribió (p. 7): “La mayoría de los suelos son de escaso o ningún valor agrícola porque son escarpados y de poca profundidad con respecto al lecho rocoso. La mayoría de las zonas son inaccesibles y las veredas que existen son muy rocosas, lo cual dificulta el paso a pie. Los suelos al pie de las laderas y de los valles estrechos entre las lomas escarpadas son más útiles que los de otras partes. La precipitación por lo general es alta en toda la zona y bien distribuida a través de todo el año. Pocas carreteras y caminos agrícolas nuevos atraviesan esta asociación. La construcción de carreteras y caminos es costosa”.

La designación propuesta de terrenos públicos se concentra en el 27 por ciento de la franja kárstica, es decir, el 16 por ciento de la región caliza (tabla 2), además de una pequeña fracción de terrenos no aptos para el cultivo. La protección de estos terrenos aportará a la recarga del acuífero de la región y asegurará la disponibilidad de la zona silvestre más extensa de la isla para el sustento de los usos humanos compatibles, necesarios para los estilos de vida de excelencia. Los paisajes que proponemos proteger no se encuentran en ninguna otra parte de los Estados Unidos, y los servicios que proveerán a los puertorriqueños y puertorriqueñas no se pueden duplicar en ninguna otra parte de la Isla, ya tan urbanizada. La protección de la franja kárstica asegura un abasto de agua subterránea de alta calidad; la conservación de la biodiversidad; espacios abiertos para la recreación y el ecoturismo; y ecosistemas maduros para actividades educativas e investigativas, así como para productos y servicios forestales.

Agradecimientos

Este informe se preparó con la cooperación de la Universidad de Puerto Rico. Agradecemos las aportaciones de Hilda Díaz Soltero, Jack Craven, James P. Oland y Griselle Sánchez, que hicieron posible esta publicación. Damos las gracias también a S. Colón Lopez, R. L. Joglar, B. Yoshioka, S.B. Peck y G. Ruiz Hue por sus sugerencias y la información que brindaron para mejorar el manuscrito. Las siguientes personas revisaron el manuscrito: J. Collazo, C. Delannoy, J. Francis, R. García, F. Gómez Gómez, A. Handler Ruiz, M. Keller, J. Miller, I. Ruiz Bernard, F.N. Scatena, A. Silva, J. Torres, S.I. Vega, F. Wadsworth y J. Wunderle. Anne Catesby Jones llevó a cabo la traducción del informe y Mildred Alayón, Katia Avilés Vázquez y Carmen R. Guerrero Pérez colaboraron en la edición y producción del informe traducido.

Referencias

Abruña, F., M.A. Lugo López, y R. Pérez Escobar. 1977. Los suelos de Puerto Rico. En *Geovisión de Puerto Rico*. M.T.B. de Galiñanes, ed. Río Piedras, PR: Editorial Universitaria. 120-157 p.

Acevedo Rodríguez,P. y F.S. Axelrod. 1999. Annotated checklist for the tracheophytes of Río Abajo forest reserve, Puerto Rico. *Caribbean Journal of Science*. 35:265-285.

Acevido, G. 1982. *Soil survey of Arecibo area of northern Puerto Rico*. Washington, DC: USDA Soil Conservation Service. 169 p. +maps.

Aguayo, C.G. 1966. Una lista de los moluscos terrestres y fluviales de Puerto Rico. *Stahlia*. 5:1-17.

Allen, J.A. 1916. An extinct Octodont from the island of Porto Rico, West Indies. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 27:17-22.

Alvarez, M., P. Acevedo Rodríguez, y M. Vázquez Otero. 1983. Quantitative description of the structure and diversity of the vegetation in the limestone forest of Río Abajo Forest. Progress Report, Project W-10. San Juan, PR: Puerto Rico Department of Natural Resources.

Alvarez Ruiz, M., P. Acevedo Rodríguez, y M. Vázquez. 1997. Quantitative description of the structure and diversity of the vegetation in the limestone forest of Río Abajo, Arecibo-Utuado, Puerto Rico. *Acta Científica*. 11:21-66.

American Ornithologist’s Union. 1976. Report of the committee on conservation. *Auk*. 93(4, suplemento): 1DD-19DD.

Anthony, H.E. 1916a. Preliminary diagnosis of an apparently new family of insectivores. *Bulletin American Museum Natural History*. 35:725-728.

Anthony, H.E. 1916b. Preliminary report of fossil mammals from Porto Rico, with descriptions of a new genus of Hystricomorph rodents. *Annals of New York Academy of Sciences*. 27:193-203.

Anthony, H.E. 1917. New fossil rodents from Porto Rico, with additional notes on *Elasmodontomys obliquus* Anthony and *Heterospsomys insulans* Anthony. *Bulletin American Museum of Natural History.* 37:183-189.

Arana Soto, S. 1969. Nuestra Isla Mona. Barcelona, España: Minguza. 82 p.

Aron, J.M. 1973. Geology and mineral resources of Isla de Mona. In Mona and Monito Islands: an assessment of their natural and historical resources. Puerto Rico San Juan, PR: Environmental Quality Board. 2:B1-B7.

Atkins, J.B., F. Pérez Blair, y J.L. Parman. 1999. Análisis of flow durations for selected streams in Puerto Ricothrough 1994. Water Resources Investigations Report 98-4189. San Juan, PR: U.S. Geological Survey. 32 p.

Beard, J.S. 1949. Natural vegetation of the windward and leeward islands. *Oxford Forestry Memoirs*. 21:1-192.

Beard, J.S. 1955. The classification of tropical American vegetation types. *Ecology.* 36:89-100.

Behrensmeyer, A.K., J.D. Darmuth, W.A. DiMichele, R. Pots, H.D. Sues, y S.L. Wing, editors. 1992. *Terrestrial ecosystems through time*. Chicago, IL: The University of Chicago Press. 568 p.

Biaggi, V. 1997. *Las aves de Puerto Rico*. Río Piedras, PR: Editorial Universitaria, Universidad de Puerto Rico. Quinta Edición.

Birdsey, R.A. y P.L. Weaver. 1982. *The forest resources of Puerto Rico*. Resource Bulletin SO-85. New Orleans, LA: USDA Forest Service, Southern Forest Experiment Station.

Birdsey, R.A. y P.L. Weaver. 1987. *Forest area trends in Puerto Rico*. Research Note SO-331. New Orleans, LA: USDA Forest Service, Southern Forest Experiment Station.

Borges, S. y A.G. Moreno. 1990. Contribución al conocimientote los oligoquetos terrestres de Puerto Rico: Las "pheretimas." *Caribbean Journal of Science*. 26:(3-4):141-151.

Borges, S. y A.G. Moreno. 1992. Redescripción de *Trigaster rufa* (Gates 1962) (Oligochaeta: Octochaetidae). *Caribbean Journal of Science*. 28(1-2): 47-50.

Bowdish, B.S. 1902. Birds of Porto Rico. *Auk*. 19: 357-366.

Bowdish, B.S. 1903. Birds of Porto Rico. *Auk*. 20: 10-23.

Briggs, R.P. 1966. The blanket sands of northern Puerto Rico. Transactions of the third Caribbean geological Conference. Robinson, E. editor. Kingston, Jamaica: Geological Survey Department of Jamaica. pp. 60-69.

Bunkley Williams, L. y E.H. Williams Jr. 1994. Parasites of Puerto Rican freshwater sport fishes. Sportfish disease project. Lajas, PR: Department of Marine Sciences, University of Puerto Rico. 164 p.

Carlo Joglar, T.A. 1999. Diet, Fruit Prefernce and Seed Dispersal Capabilities of Fruit-eating Birds in North-central Puerto Rico. Raleigh, NC: Department of Zoology, North Carolina State University. 109 p. Thesis.

Calvesbert, R.J. 1973. The climate of Mona Island. In Mona and Monito Islands: an assessment of their natural and historical resources. San Juan, PR: Puerto Rico Environmental Quality Board. 2:A1-A11.

Chinea, J.D. 1980. *The Forest Vegetation of the Limestone Hills of Northern Puerto Rico.* Ithaca, NY: Cornell University. 70p. Thesis.

Chubb, L.J. 1963. Bauxite genesis of Jamaica. *Economic Geology.* 58: 286-289.

Cintrón, B.B. 1979. Effects on introduced animals on the vegetation of Mona Island. En Memorias del tercer simposio de los recursos naturales. pp. 88-99.

Cintrón, B. y L. Rogers. 1991. Plant communities of Mona Island. *Acta Científica*. 5(1-3): 10-64.

Cintrón, G., A.E. Lugo, D.J. Pool, y G. Morris. 1978. Mangroves of arid environments in Puerto Rico and adjacent islands. *Biotropica*. 10(2):110-121.

Comer, J.B: 1974. Genesis of Jamaican Bauxite. *Economic Geology.* 69(8): 1251-1264.

COE. 1973. Flood plain information Río Cibuco, and Río Indio, Vega Baja and Vega Alta, Puerto Rico. Jacksonville, FL: U.S. Army Corps of Engineers. 37 p. + 14 plates.

Conde Costas, C. y F. Gómez Gómez. 1999. Assessment of nitrate contamination of the upper aquifer in the Manatí – Vega Baja area, Puerto Rico. Water Resources Investigations Report 99-4040. San Juan, PR: U.S. Geological Survey. 43 p.

Cortés Burgos, S. 1990. Estudio de la transferencia de agua del acuífero artesiano al acuífero llano en la costa norte. En Memorias del decimosexto simposio de los recursos naturales. San Juan, PR: Departamento de Recursos Naturales. pp. 93-96.

Courbon, P., C. Chabert, P. Bosted, and K. Lindsley. 1989. Puerto Rico. Atlas of the great caves of the world. En Cave Book. St. Louis, MO. pp. 84-86.

Covich, A.P. y W.H. McDowell. 1996. The stream community. In The food web of a tropical rain forest. D.P. Reagan y R.B. Waide, editors. Chicago, IL: University of Chicago Press. pp. 433-459.

Cruzado Torres, D.G. 1996. Preliminary investigation of bauxite deposits in the Florida area, Puerto Rico. Mayagüez, PR: Department of Geology, University of Puerto Rico. 37 p. Undergraduate Research Report.

Culver, D.C., L.L. Master, M.C.Christman, y H.H. Hobbs. 1999. Obligate cave fauna of the 48 contiguous United States. *Conservation Biology.* 14: 386-401.

Danforth, S.T. 1931. Puerto Rican ornithological records. *Journal of Agriculture University of Puerto Rico.* 15: 33-106.

Danford, S.T. y J.A. Smyth. 1935. The Puerto Rican form of the broad-winged hawk. *Journal of Agriculture University of Puerto Rico*. 19: 485-486.

Delannoy, C.A. 1992. Status surveys of the Puerto Rican broad-winged hawk (*Buteo platypterus brunnescens*). Final status sreport submitted to the U.S. Fish and Wildlife Service, contract no. 14-16-0004-82-047. 66p.

Delannoy, C.A. 1997. Status of the Broad-winged Hawk and Sharp-shinned Hawk in Puerto Rico. *Caribbean Journal of Science*. 33: 21-33.

del Llano, M. 1988. Map of the wetlands of Puerto Rico. *Acta Científica*. 2: cover.

Díaz, C. 1983. Los Mamíferos de Puerto Rico, en J. Vivaldi, Ed. *Compendio Enciclopédico de los Recursos Naturales,* Departamento de Recursos Naturales, Vol. 5. 254 pp.

Domínguez Cristóbal, C.M. 1989a. La situación forestal pre-hispánica de Puerto Rico. *Acta Científica*. 3: 63-66.

Domínguez Cristóbal, C.M. 1989b. La situación forestal de Puerto Rico durante el siglo XVI. *Acta Científica*. 3: 67-70.

Dopazo, T. y W.L. Molina Rivera. 1995. Estimated water use in Puerto Rico, 1988-89. Open File Report 95-380. San Juan, PR: U.S. Geological Survey. 31 p.

Dugger, K.R., J.E. Cardona, J. González Liboy, y D.J. Pool. 1979. *Habitat evaluation in the wet limestone forest of Río Abajo.* Final report, Project W-8. San Juan, PR: U.S. Fish and Wildlife Service and Puerto Rico Department of Natural Resources. 186 p.

Erdman, D.S. 1961. Notes on the biology of the gobiid fish *Sicyhdium plumieri* in Puerto Rico. *Bulleting of Marine Science of the Gulf and Caribbean.* 3: 448-456.

Erdman, D.S. 1967. *Inland game fishes of Puerto Rico*. Department of Agriculture, Federal Aid Project F-1-R. San Juan, PR: Commonwealth of Puerto Rico.

Erdman, D.S. 1972. *Inland game fishes of Puerto Rico*. 2nd Edition. San Juan, PR: Department of Agriculture, Commonwealth of Puerto Rico. 96 p.

Erdman, D.S. 1984. Exotic fishes in Puerto Rico. In *Distribution, Biology and Management of Exotic fishes.* W.R. Courtenay Jr. y J.R. Stauffer, Jr. Editors. Baltimore, MD: John Hopkins University Press. 430 p.

Field, M.S. 1999. *A lexicon of cave and karst terminology with special refernce to environmental karst hydrology.* Washington, DC: US Envrionmental Protection Agency, Office of Research and Development. EPA/600/R-99/006. 195 p.

Figueroa Colón, J. 1995. Phytogeographical trends, centers of high species richness and endemism and the question of species extinctios in the native flora of Puerto Rico. En The Scientific Survey of Puerto Rico and the Virgin Islands: an eighty yearreassessment of the islands' natural history. J. Figueroa Colón, ed. *Annals of the New York Academy of Sciences*. New York.

Figueroa, J.C., L. Totti, A.E. Lugo, y R. Woodbury. 1984. *Structure and composition of moist coastal forests in Dorado, Puerto Rico*. New Orleans, LA: USDA Forest Service, Southern Forest Experiment Station. Research paper SO-202. 11 p.

Francis, J.K. 1995. Forest plantations in Puerto Rico. In *Tropical forests: Management and ecology.* A.E. Lugo y C. Lowe, editors. New York, NY: Springer Verlag. 210-223 p.

Franco, P.A., P.L. Weaver, y S. Eggen-McIntosh. 1997. *Forest resources of Puerto Rico,* 1990. USDA Forest Service Southern Research Station. Resource Bulletin SRS-22. 45 p.

Frank, E.F. 1998a. A radiocarbon date of 380 + 60 BP for a Taíno site, Cueva Negra, Isla de Mona, Puerto Rico. *Journal of Cave and Karst studies*. 60(2): 101-102.

Frank, E.F. 1998b. History of the guano minino industry, Isla de Monda, Puerto Rico. *Journal of Cave and Karst Studies*. 60(2): 121-125.

Frank, E.F., C. Wicks, J. Mylroie, J. Troester, E.C. Alexander Jr., y J. Carew. 1998a. Geology of Isla de Mona, Puerto Rico. *Journal of Cave and Karst Studies*. 60(2): 69-72.

Frank, E.F., J. Mylroie, J. Troester, E.C. Alexander Jr., y J. Carew. 1998b. Karst development and speleogenesis, Isla de Mona, Puerto Rico. *Journal of Cave and Karst Studies*. 60(2): 69-72.

García Díaz, J. 1967. Rediscovery of *Bufo lemur* (Cope) and additional records of reptiles from Puerto Rico. *Stahlia*. 10: 1-6.

García Ríos, C.I. 1998. *Listado de los peces que viven en agues territoriales de Puerto Rico.* Humacao, PR: Departamento de Biología, Colegio Universitario de Humacao, Mimeo. 38 p.

Gierbolini, R.E. 1975. *Soil survey of Mayagüez area of western Puerto Rico.* Washington, DC: USDA Soil Conservation Service. 296 p. + maps.

Giusti, E.V. 1978. *Hydrogeology of the karst of Puerto Rico.* Geological Survey Professional Paper 1012. Washington, DC: U.S. Government Printing Office. 68 p. + map.

Giusti, E.V. y G.D. Bennett. 1976. *Water resources of the north coast limestone area, Puerto Rico.* Water-Resources Investigations 42-75. San Juan, PR: US Geological Survey Water Resources Division. 42 p.

Gleason, H.A. y M.T. Cook. 1926. Plant ecology of Porto Rico. *Scientific Survey of Porto Rico and the Virgin Islands.* 7: 1-173. New York, NY: New York Academy of Sciences.

Goebel, A.M. 1996. *Systematics and conservation of Bufonids in North America and in the Bufo boreas species group*. Boulder, CO: University of Colorado. Dissertation.

Gómez Gómez, F. 1984. *Water Resources of the lower Río Grande de Manatí valley, Puerto Rico*. Water Resources Investigations Report 83-4199. San Juan, PR: US Geological Survey. 42 p.

Gómez Gómez, F. 1991. Ground water development in the artesian aquifer in northcentral Puerto Rico and possible effects of future withdrawals. In 23rd International Congress of the International Association of Hydrogeologists. Tenerife, Canary Islands. 221-225 p.

Gómez Gómez, F. y H. Torres Sierra. 1988. *Hydrology and effects of development on the water table aquifer in the Vega Alta quadrangle, Puerto Rico.* San Juan, PR: US Geological Survey. Water Resources Investigations Report 87-4105. 54 p.

Gómez Gómez, F., F. Quiñones, y M. López. 1984. *Public water supplies in Puerto Rico*, 1983. Open File Report 84-126. San Juan, PR: US Geological Survey. 102 p.

González Azar, J. 1992. *Guía para la pesca recreativa en los embalses de Puerto Rico.* Programa de educación de recursos acuáticos. San Juan, PR: Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, Estado Libre Asociado de PR. 201 p.

Graham, A. 1996. Paleobotany of Puerto Rico—from Arthur Hollick's (1928) scientific survey paper to the present. In The scientific survey of Puerto Rico and the Virgin Islands: an eighty year reassessment of the Island's natural history. J.C. Figueroa Colón, editor. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 776. New York, NY. 103-114 p.

Grana Raffucci, F.A. 1993. *Catálogo de nomenclatura de los peces de Puerto Rico y las Islas Virgenes.* 2da Edición. San Juan, PR: Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, Estado Libre Asociado de Puerto Rico. 201 p.

Grant, C. 1933. Notes on *Epicrates inornatus*. *Copeia*. 1933: 224-225.

Guzmán Ríos, S. 1983. *Reconnaissance of the principal springs of Puerto Rico*, 1982-83. Open File Data Report 83-683. San Juan, PR: US Geological Survey.

Guzmán Ríos, S. y F. Quiñones Márquez. 1985. *Reconnaissance of trace-organic compounds in ground water throughout Puerto Rico*, October 1983. Open File Data Report 84-810. San Juan, PR: US Geological Survey.

Halton, P. 1996. Cave photo course and the Río Encantado expedition. *National Speleological Survey News*. September: 233-243.

Hernández, B. 1978. Geología de los yacimientos de bauxita de Pedranales. En Memoria del Primer Seminario sobre el sector minero. R.A. Llinás y A.V. Malagón, editores. Santo Domingo, República Dominicana. 133-138 p.

Hernández Prieto, E. 1980. Estudio de aves, reptiles y anfibios en la reserva forestal de Carite. Río Piedras, PR: Programa de Mantenimiento Ambiental, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Puerto Rico.

Hernández Prieto, E.N. 1993. *Ecological comparison of the land bird fauna of two subtropical dry forests in the West Indies*. Boulder, CO: Department of Environmental, Population and Organismic Biology, University of Colorado-Boulder. Dissertation.

Hernández Prieto, E. 2001. *Status review of the Puerto Rican Crested Toad (Peltophryne lemur) on the northwestern coast Puerto Rico.* Final Report to the US Fish and Wildlife Service. Humacao, PR: University of Puerto Rico. 25 p.

Hertz, P.E. 1992. Evaluating thermal resource partitionaing by sympatric lizards *Anolis cooki* and *Anolis cristatellus*: A field test using null hypothesis. *Oecologia*. 90(1): 127-136.

Hickenlooper, I.J. 1967. *Floods at Barceloneta and Manatí, Puerto Rico*. Hydrologic Investigations Atlas HA-262. Washington, DC: U.S. Geological Survey.

Hildebrand, F.A. 1960. *Occurrences of bauxitic clay in the karst area of north central Puerto Rico.* En Short papers in the geological sciences. Geological Survey Research 1960. US Geological Survey Professional Paper 400B. p. B360-B371.

Hill, R.T. 1899. Porto Rico. *National Geographic.* 10: 93-112.

Hill, V.G. y S. Ostojic. 1982. The bauxite deposits of Jamaica. A.A. Lyew, editor. A distinctive karstic type. In Proceedings of the bauxite symposium No. 5. *Journal of the Geological Society of Jamaica.* Kingston, Jamaica. 9-18 p.

Holdridge, L.R. 1967. *Life zone ecology.* San José, Costa Rica: Tropical Science Center. 206 p.

Hollick, A. 1924. A review of the fossil flora of the West Indies, with descriptions of new species. *Bulletin New York Botanical Gardens*. 27: 223-227.

Hollick, A. 1926. Fossil walnuts and lignite from Porto Rico. *Journal of the New York Botanical Gardens*. 27: 97-102.

Hollick, A. 1928. *Paleobotany of Puerto Rico.* Scientific Survey of Puerto Rico and the Virgin Islands 7(3). New York, NY: New York Academy of Sciences.

Hubbard, B. 1923. The *geology of the Lares district, Puerto Rico.* New York Academy of Sciences Scientific Survey of Puerto Rico and the Virgin Islands. 2(1): 1-115.

Jennings, J.N. 1971. *Karst.* Cambridge, MA: MIT Press. 241 p.

Joglar, R.L. 1998. Los *Coquíes de Puerto Rico: su historia natural y conservación.* Río Piedras, PR: Editorial Universitaria, Universidad de Puerto Rico. 232 p.

Joglar, R.L. y P.A. Burrowes. 1996. Declining amphibian populations in Puerto Rico. In *Contributions to West Indian Herpetology: A tribute to Albert Schwartz*. R. Powell, y R.W. Henderson, editors. Ithaca, New York: Society for the Study of Amphibians and Reptiles. 371-380 p.

Lafalaise, B. 1980. La bauxite de la République d'Haiti. En Presentations et transcatios du 1er colloque sur la geologies d'Haiti. F.J.M.R., editor. Port au Prince. 112-115 p.

Little, E.L. y F.H. Wadsworth. 1964. *Common trees of Puerto Rico and the Virgin Islands*. Agriculture Handbook No 249. Washington, DC: USDA Forest Service. 548 p.

Little, E.L., R.O. Woodbury, y F.H. Wadsworth. 1974. *Trees of Puerto Rico and the Virgin Islands.* Washington, DC: USDA Forest Service Agriculture Handbook 449. 1024 p.

López, T.del Mar, T.M. Aide, y J.R. Thomlinson. 2001. Urban expansion and the loss of prime agricultural lands in Puerto Rico. *Ambio*. 30: 49-54.

Lugo, A.E. 1991. Dominancia y diversidad de plantas en isla de Mona. *Acta Científica*. 5: 65-71.

Lugo, A.E. En Imprenta. Bosques húmedos y muy húmedos sobre lomas de roca caliza. En A.E. Lugo, Los Bosques de Puerto Rico. Río Piedras, PR: Editorial Universidad.

Lugo, A.E. y A.R. García Martinó. 1996. Cartilla del agua para Puerto Rico. *Acta Científica*. 10(1-3): 1-89.

Lugo, A.E. y G. Cintrón. 1975. The mangrove forests of Puerto Rico and their management. In Proceedings of international symposium on biology and management of mangroves. G. Walsh, S. Snedaker, y H. Teas, editors. Gainesville, FL: Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. 825-846 p.

McDowell, B. 1962. Puerto Ricos´s seven-league bootstraps. *National Geographic*. 122: 755-793.

McFarlane, D.A. 1999a. Late Quaternary fossil mammals and last occurrence dates from caves at Barahona, Puerto Rico. *Caribbean Journal of Science*. 35: 238-248.

McFarlane, D.A. 1999b. *A note on dimorphism in Nesophontes edithae* (Mammalia: Insectivora), an extinct island shrew from Puerto Rico. *Caribbean Journal of Science.* 35: 142-143.

McGuiness, C.L. 1963. *The role of ground water in the national water situation.* US Geological Survey Water Supply Paper 1800. Washington, DC: US Government Printing Office.

Martin, F.D y J.W. Patus. 1988. Clave para los peces teleósteos de Puerto Rico. En Compendio Enciclopédico de los recuros naturales de Puerto Rico. J.L. Vivaldi y C. Paniagua, editores. San Juan, PR: Departamento de Recursos Naturales. 3: 1-191.

Martorell, L.F. 1945. A survey of the forest insects of Puerto Rico. *Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico.* 29(1-2).

Miller, T.E. 1987. Fluvial and collapse influences on cockpit karst of Belize and eastern Guatemala. In B. Beck y W. Wilson, editors. Karst hydrogeology: engineering and environmental application. Orlando, FL: Florida Sinkhole Research Institute, University of Central Florida. 53-57 p.

Miller, T.E. 2000. Karst processes in Puerto Rico. Nineteenth annual symposium of Caribbean Geology. February 23-26, Mayagüez, PR: University of Puerto Rico.

Miller, T.J. 1985. Husbandry and breeding of the Puerto Rican Toad (*Peltophryne lemur*) with comments on its natural history. *Zoo Biology.* 4: 281-286.

Molina Rivera, W.L. 1997. *Ground water use from the principal aquifers in Puerto Rico during calendar year 1990.* Fact Sheet FS-188-96. San Juan, PR: US Geological Survey Caribbean District. 3 p.

Molina Rivera, W.L. 1998. *Estimated water use in Puerto Rico, 1995.* Open File Report 98-276. San Juan, PR: US Geological Survey. 28 p.

Molina Rivera, W.L. y T. Dopazo. 1995. *Estimated water use in Puerto Rico, 1986-87.* Open File Report 95-358. San Juan, PR: US Geological Survey. 31 p.

Monroe, W.H. 1966. Formation of tropical karst topography by limestone solution and reprecitation. *Caribbean Journal of Science.* 6: 1-7.

Monroe, W.H. 1967. *Geologic map of the Qebradillas quadrangle, Puerto Rico.* Miscellaneous Geologic Investigations (Map I-498). Washington, DC: Department of the Interior, US Geological Survey.

Monroe, W.H. 1971. *Geologic map of the Manatí quadrangle, Puerto Rico.* Miscellaneous Geologic Investigations Map I-671. Washington, DC: Department of Interior, US Geological Survey.

Monroe, W.H. 1976. *The karst landforms of Puerto Rico.* US Geological Survey Professional Paper 899. Washington, DC: US Government Printing Office. 69 p. + map.

Monroe, W.M. 1980. *Geology of middle Tertiary Formations of Puerto Rico.* US Geological Survey Professional Paper 953. Washington, DC: Department of the Interior, US Geological Survey. 93 p. + map.

Morales Cardona, T., B. Ruiz, A.E. Lugo, y G. Morris. 1994. Un llamado a la acción para salvaguardar el patrimonio natural y la calidad de vida en Puerto Rico. *Acta Científica.* 8: 67-70.

Moreno, J.A. 1991. Accounts of those species considered to be concern. En Status y distribución de los reptiles y anfibios de la región de Puerto Rico. J.A. Moreno, editor. San Juan, PR: Publicación Miscelánea del Departamento de Recursos Naturales de Puerto Rico. 9-10 p.

Morris, G.L. y J. Fan. 1997. *Reservoir sedimentation handbook: design and management of damns, reservoirs, and watersheds for sustainable use.* New York, NY: McGraw Hill.

Negrón González, L. 1986. Las lagunas de Puerto Rico. Compendio enciclopédico de los recursos naturales de Puerto Rico. 9: 1-248. San Juan, PR: Area de Investigaciones Científicas, Departamento de Recursos Naturales.

Nelson, A.E., y W.H. Monroe. 1966. *Geology of the Florida quadrangle, Puerto Rico.* Bulletin 1221-C. Reston, VA: US Geological Survey. 22 p.

Neváres, R. y J. Villamil. 1980. Laguna de Tortuguero: recopilación comprensiva de datos sobre la estructura, funcionamento y utilización de este recurso natural. CEER T-068. Río Piedras, PR: Center for Energy and Environmental Research. University of Puerto Rico. 116 p.

Nieves Rivera, A.M. 1999. El mar prehistórico de Puerto Rico. Ancestro del tiburón blanco. *Boletín Marino Sea Grant.* 20(1-3): 1-6.

Office of Economic Research. 1999. Puerto Rico Directory of Manufacturers. San Juan, PR: Economic Development Administration Commonwealth of Puerto Rico. 300 p.

Olson, S.L. 1976. Fossil woodcocks: an extinct species from Puerto Rico and an invalid species from Malta (Aves: Scolopacidae: Scolopax). Proceedings of Biological Society. Washington, DC. 89: 265-274.

Olson, S.L. 1982. A new species of palm swift (Tachornis: Apodidae) from the Pleistocene of Puerto Rico. *Auk.* 99: 230-235.

Olson, S.L. y M.C. McKitrick. 1981. A new genus and species of Emberizine finch from Pleistocene cave deposits in Puerto Rico (Aves: Passeriformes). *Journal of Vertebrate Paleontology* 1: 279-283.

Ortiz, P.R. 1979. *Behavioral comparison of anoline competitors: Anolis cooki and Anolis cristatellus (Reptilia: Iguanidae).* Blacksgurg, VA: Virginia Polytechnic Institute and State University. Thesis.

Ortiz, P.R. 1985. Distribution of the lizard Anolis cooki, with comments on its possible future extinction. *Herpetological Review.* 16(4): 99-102.

Ortiz, P.R. y T.A. Jenssen. 1982. Interspecific agresión between lizard competitors, *Anolis cooki* and *Anolis cristatellus.* Zietschraft für Tierpsychology. 60: 227-238.

Peck, S.B. 1974. The invertebrate fauna of tropical American caves, Part II: Puerto Rico, an ecological and zoogeographic anlysis. *Biotropica.* 6: 14-31.

Peck, S.B. 1981. Zoogeography of invertebrate cave faunas in southwestern Puerto Rico. *National Speleological Society Bulletin.* 43: 70-79.

Peck, S.B. y J. Kukalova Peck. 1981. The subterranean fauna and conservagtion of Mona Island (Puerto Rico): a Caribbean karst environment. *National Speleological Society Bulletin.* 43: 59-68.

Peck, D.L., J.W. Troester, y J.E. Moore. 1988. *Karst hydrogeology in the United States of America.* Open File Report 88-476. San Juan, PR: US Geological Survey. 19 p.

Pérez Rivera, R.A. y R. Cotté Santana. 1977. Algunas notas sobre los falconiformes residentes en Puerto Rico. *Science-Ciencia*. 4: 89-95.

Petrunkevitch, A. 1929. The spiders of Puerto Rico, Part I. Transactions of the Conneticut Academy of Arts and Sciences. 30: 1-158.

Petrunkevitch, A. 1930a. The spiders of Puerto Rico, Part II. Transactions of the Conneticut Academy of Arts and Sciences. 30: 159-355.

Petrunkevitch, A. 1930b. The spiders of Puerto Rico, Part III. Transactions of the Conneticut Academy of Arts and Sciences. 31: 1-191.

Picó, R. 1950. The *Geographic Regions of Puerto Rico*. Río Piedras. PR: University of Puerto Rico Press. 256 p.

Picó, R., Z. Buitrago de Santiago, y H.H. Berríos. 1975. Nueva geografía de Puerto Rico. Río Piedras, PR: Editorial Universidad, Universidad de Puerto Rico. 460 p.

Pool, D.J. y G. Morris. 1979. Land use in the mogotes. En Memorias del tercer simposio de los recursos naturales. San Juan, PR: Departamento de Recursos Naturales. 124-132 p.

Post, W. y J.M. Wiley. 1976. The Yellow-Shouldered Blackbird: present and future. *American Birds*. 30: 13-20.

Pregill, G.K. 1981. Late Pleistocene herpetofaunas from Puerto Rico. Miscellaneous Publications, University of Kansas Museum of Natural History. 71: 1-72.

Pregill, G.K. y S.L. Olson. 1981. Zoogeography of West Indian vertebrales in relation to Pleistocene climatic cycles. *Annual Review of Ecology and Systematics.* 12: 75-98.

Quiñones Aponte, V. 1986. *Water resources of the lower Río Grande de Arecibo alluvial valley, Puerto Rico.* Water Resources Investigations Report 85-4160. San Juan, PR: US Geological Survey. 38 p.

Quiñones Márquez, F. y L.A. Fusté. 1978. *Limnology of Laguna Tortuguero.* Water Resources Investigations Report 77-122. San Juan, PR: US Geological Survey. 86 p.

Raffaele, H. 1973. Assessment of Mona Island avifauna. In Mona and Monito Islands: An assessment of their natural and historical resources. San Juan, PR: Puerto Rico Environmental Quality Board. 2: K1-K32.

Raffaele, H. 1992. *A guide to the birds of Puerto Rico and the Virgin Islands*. Princeton, NJ: Princeton University Press. 254 p.

Ramos, O.M. y A.E. Lugo. 1994. Mapa de la vegetación de Puerto Rico. *Acta Científica.* 8(1-2): 63-66.

Raúl Díaz, J. 1973. *Chemical quality of water in Caño Tiburones, Puerto Rico.* US Geological Survey Open File Report Map Series No 2. San Juan, PR. 2 plates.

Reagan, D.P. y C.P. Zucca. 1982. Inventory of the Puerto Rican Boa (*Epicrates inornatus*) in the Caribbean National Forest. CEER T-136. San Juan, PR: Center for Energy and Environment Research, University of Puerto Rico. 42 p.

Ricart Morales, C.M. 1999. *Frugivory by birds in two subtropical dry forewt tree species (almácigo, Bursera simaruba, and guayacán, Guaiacum officinale) in Guánica, Puerto Rico.* Boulder, CO: Department of Environmental, Population and Organismic Biology, University of Colorado. Dissertation.

Richard, R.T., J.W. Troester, y M.I. Martínez. 1998. An electromagnetic geophysical survey of the freshwater lens of Isla de Mona, Puerto Rico. *Journal of Cave and Karst Studies*. 60(2): 115-120.

Ríos Lavienna, G. 1933. *Guía del agricultor isla de Puerto Rico.* Arecibo, PR: Editorial Pozo. 372 p.

Ríos, N. y R. L. Joglar. 1999. Rana grylio (Pig frog) in Puerto Rico. *Herpetological Review.* 30(4):231-232.

Rivera, L.W. 1998. *Secondary succession in Caribbean karst forests.* Río Piedras, PR: University of Puerto Rico. 153 p. Dissertation.

Rivera, L.W. y T.M. Aide. 1998. Forest recovery in the karst region of Puerto Rico. Forest *Ecology and Management*. 108: 63-75.

Rivera, M. 1994. Aspectos sobre la biología del cangrejo de agua dulce *Epilobocera sinuatiforns* (Buruquena) en Puerto Rico. En Memorias del Decimotercer simposio de la flora y fauna del Caribe. Humacao, PR: Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Humacao. 7-10 p.

Rivera Milán, F.F. 1993. Standardization of roadside counts of columbids in Puerto Rico and Vieques Island. *USDI National Biologial Survey Resource Publication.* 197: 1-26.

Rivero, J.A. 1998. Los anfibios y reptiles de Puerto Rico. San Juan, PR: Universidad de Puerto Rico. Editorial Universitaria. 510 p.

Rivero, J.A., H. Mayorga, E. Estremera, y I. Izquierdo. 1980. Sobre el Bufo lemur (Cope) (Amphibia, Bufonidae). *Caribbean Journal of Science*. 15(3-4): 33-40.

Rivero, J.A. y D. Seguí Crespo. 1992. Anfibios y reptiles en nuestro folklore. Imprenta San Rafael, Quebradillas.

Roberts, R.C. 1942. *Soil survey of Puerto Rico.* USDA Soil Survey Report No. 8, Series 1936. Washington, DC. 503 p.

Rodríguez Durán, A. 1996. Foraging ecology of the Puerto Rican Boa (*Epicrates inornatus*): bat predation, carrion feeding, and piracy. *Journal of Herpetology.* 30: 533-536.

Rodríguez Durán, A. 1998. Distribution and non-random aggregations of the cave bats of Puerto Rico. *Journal of Mammalogy.* 79: 141-146.

Rodríguez Durán, A. y A.R. Lewis. 1985. Seasonal predation by merlins on soothy mustached bats in western Puerto Rico. *Biotropica*. 17: 71-74.

Rodríguez Durán, A. y A.R. Lewis. 1987. Patterns of population size, diet, and activityfor a multispecies assemblage of bats. *Caribbean Journal of Science.* 23: 352-360.

Rodríguez Martínez, J. 1995. *Hydrogeology of the north coast limestone aquifer system of Puerto Rico.* Water Resources Investigations Report 94-4249. San Juan, PR: US Geological Survey. 22 p.

Rodríguez Martínez, J. 1997. *Characterization of springflow in the north coast limestone of Puerto Rico using physical, chemical, and stable isotopic methods.* Water Resources Investigations Report 97-4122. San Juan, PR: US Geological Survey. 53 p.

Rodríguez Ramírez, J.G. 1991. Reproducción en los teidos de Puerto Rico *Ameiva exsul y Ameiva wetmorei. Herpetologica*. 47(4): 395-403.

Rodríguez Ramírez, J.G. 1994. *Status survey of Ameiva wetmorei*. Report to the US Fish and Wildlife Service. Ponce, PR: University of Puerto Rico.

Rogers, L. 1974. The vegetation of Mona Island. En Memorias del primer simposio de los recursos naturales. San Juan, PR: Departamento de Recursos Naturales. 41-46 p.

Román Más, A. y R.W. Lee. 1987. Geochemical evolution of waters within the north coast limestone aquifers of Puerto Rico: a conceptualization based on a flow bath in the Barceloneta area. Water Resources Investigations Report 86-4080. San Juan, PR: US Geological Survey. 28 p.

Ruiz, C. y J.L. Chabert. 1989. Notas sobre el comportamiento y ecología de los cabros en Isla de Mona. En Memorias del decimoquinto simposio de los recursos naturales. San Juan, PR: Departamento de Recursos Naturales. 1-46 p.

Santiago de Rohena, E. 1974. *Taxonomy and geographic distribution of the Chilopoda of Puerto Rico.* Río Piedras, PR: Department of Biology, University of Puerto Rico. Thesis.

Santiago Blay, J. 1984. *The scorpions of Puerto Rico.* Río Piedras, PR: Department of Biology, University of Puerto Rico. Thesis.

Seiglie, G.A. y M.T. Moussa. 1984. Late Oligocene-Pliocene transgressive-regressive cycles of sedimentation in northwestern Puerto Rico. In Interregional unconformities and hydrocarbon accumulation. J.S. Schlee, editor. American Association of Petroleum Geologists Memoir 36. p. 89-98.

Sepúlveda, N. 1999. *Ground-water flow, solute transport, and simulation of remedial alternatives for the water-table aquifer in Vega Alta, Puerto Rico.* Water Resrouces Investigations Report 97-4170. San Juan, PR: US Geological Survey. 96 p.

Snyder, N.F.R., J.W. Wiley, y C.B. Kepler. 1987. *The parrots of Luquillo: natural history and conservation of the Puerto Rican Parrot*. Los Angeles, CA: Western Foundation of Vertebrate Zoology. 384 p.

Solley, W.B., R.R. Pierce, y H.A. Perlman. 1998. *Estimated use of water in the United Status in 1995.* Circular 1200. Denver, CO: US Geological Survey. 71 p.

Soto, A.E. y W. Morales. 1984. Collapse sinkholes in the blanket sands of the Puerto Rico karst belt. Proceedings of the first multidisciplinary conference on sinkholes. Orlando, FL. 143-146 p.

Struthers, P.H. 1923. Observations on the bird life of Puerto Rico. *Auk.* 40: 469-478.

Tarhule-Lipps, R.F.A. y J. Carew. 1998. Condensation corrosion in caves on Cayman Brac and Isla de Mona. *Journal of Cave and Karst Studies.* 60(2): 84-95.

Taylor, E.C. 1864. Five months in the West Indies II. Martinique, Dominica, and Puerto Rico. Ibis 3: 157-173.

Torres González, A. 1985. *Simulation of ground-water flow in the water-table aquifer near Barceloneta, Puerto Rico.* Water Resources Investigations Report 84-4113. San Juan, PR: US Geological Survey. 39 p.

Torres González, A. y J.R. Díaz. 1984. *Water Resources of Sabana Seca to Vega Baja Area, Puerto Rico.* Water Resources Investigations Report 82-4115. San Juan, PR: US Geological Survey. 53 p.

Torres González, A. y R.M. Wolansky. 1984. *Planning report for the comprehensive appraisal of the ground-water resources of the north coast limestone area of Puerto Rico.* Open-File Data Report 84-427. Sna Juan, PR: US Geological Survey. 32 p.

Torres Sierra, H. y A. Avilés. 1986. *Estimated water use in Puerto Rico*, 1980-82. Open File Data Report 85-557. San Juan, PR: US Geological Survey. 77 p.

Tossas, A.G. 1995. *Neting site habitat descritpion and space requirements of the Puerto Rican broad-winged hawk.* Mayagüez, PR: University of Puerto Rico. 59 p. Thesis.

Troester, J.W. 1999. *Geochemistry and hydrogeologic framework of the saline-freshwater interface and the calculation of the net recharge in the Dorado area, North-Central Puerto Rico.* Water Resources Investigations Report 98-4030. San Juan, PR: US Geological Survey. 36 p.

Troester, J.W., E.L. White, y W.B. White. 1984. A comparison of sinkhole depth frequency distributions in temperate and tropical karst regions. In Sinkholes: their geology, engineering and environmental impact. B.F. Beck, editor. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands. 65-73 p.

Troester, J.W. y J. Rodríguez Martínez. 1990. *Field trip guide. International Symposium on Tropical hydrology and Fourth Caribbean Island Water Resources Congress.* San Juan, PR: American Water Resources Association. 40 p.

Tucci, P. y M.I. Martínez. 1995. *Hydrology and simulation of ground-water flow in the Aguadillato to Río Camuy Area, Puerto Rico.* Water Resources Investigations Report 95-4028. San Juan, PR: US Geological Survey. 39 p.

US Fish and Wildlife Service. 1984. *Puerto Rican Whip-poor-will Recovery Plan.* Atlanta, GA. 16 p.

US Fish and Wildlife Service. 1986. *Puerto Rican Boa Recovery Plan.* Atlanta, GA. 21 p.

US Fish and Wildlife Service. 1987a. *Beautiful* Goetzea *Recovery Plan.* Atlanta, GA. 35 p.

US Fish and Wildlife Service. 1987b. *Vahl's Boxwood Recovery Plan.* Atlanta, GA. 34 p.

US Fish and Wildlife Service. 1991a. Banara Venderbiltii *Recovery Plan.* Atlanta, GA. 22 p.

US Fish and Wildlife Service. 1991b. *Bariaco* (Trichilia triacantha) *Recovery Plan.* Atlanta, GA. 21p.

US Fish and Wildlife Service. 1992a. Calyptronoma rivalis (palma de manaca) *Recovery Plan.* Atlanta GA. 18 p.

US Fish and Wildlife Service. 1992b. *Recovery Plan for the Puerto Rican Crested Toad* (Peltophryne lemur). Atlanta, GA. 19 p.

US Fish and Wildlife Service. 1994a. Chamaecrista glandulosa var. mirabilis *Recovery Plan.* Atlanta, Ga. 18 p.

US Fish and Wildlife Service. 1994b. Ottoschulzia rhodoxylon (*palo de rosa*) *Recovery Plan.* Atlanta, GA. 27 p.

US Fish and Wildlife Service. 1996a. Myrcia paganii and Auerodendron pauciflorum *Recovery Plan.* Atlanta, GA. 17 p.

US Fish and Wildlife Service. 1996b. *Puerto Rican Endangered Ferns Recovery Plan.* Atlanta, GA. 23 p.

US Fish and Wildlife Service. 1996c. *Yellow-Shouldered blackbird* (Agelaius xanthomus) *Revised Recovery Plan.* Atlanta, GA. 77 p.

US Fish and Wildlife Service. 1997a. *Puerto Rican Broad-winged Hawk and Puerto Rican Sharp-shinned Hawk Recovery Plan.* Atlanta, GA. 30 p.

US Fish and Wildlife Service. 1997b. *Technical / Agency Draft Recovery plan for* Pleodendrum macanthum *and* Eugenia haematocarpa. Atlanta, GA. 36 p.

US Fish and Wildlife Service. 1999. *Technical / Agency Draft Revised Recovery plan for the Puerto Rican parrot* (Amazona vittata). Atlanta, GA. 77 p.

Van der Schalie, H. 1948. *The Land and Freshwater Mollusks of Puerto Rico.* Ann Arbor, MI: Univeristy of Michigan Press.

Vélez, M.J. 1967a. Checklist of the terrestrial and freshwater decapoda of Puerto Rico. *Caribbean Journal of Science.* 7: 41-44.

Vélez, M.J. 1967b. New records of Puerto Rican Diplopoda with notes on their geographic distribution. *Stahlia.* 8: 1-11.
Vélez, M.J. 1979a. Bibliografía selecta de la fauna y de las comunidades naturales de Puerto Rico. *Science-Ciencia.* 6(3): 106-126.

Vélez, M.J. 1979b. Bibliografía selecta de la fauna y de las comunidades naturales de Puerto Rico, segunda parte. *Science-Ciencia.* 6(4): 145-166.

Vélez, M.J. 1979c. Bibliografía selecta de la fauna y de las comunidades naturales de Puerto Rico, tercera parte. *Science-Ciencia.* 6(4): 189-218.

Wadsworth, F.H. 1973. The historical resources of Mona island. En Mona and Monito islands: an assessment of the natural and historical resources. San Juan, PR: Puerto Rico Environmental Quality Board. 2: N1-N37.

Wadsworth, F.H. y G.H. Englerth. 1959. Effects of the 1956 hurricane on forests in Puerto Rico. *Caribbean Forester.* 20: 38-51.

Wege, D.C. y A.J. Long. 1995. *Key areas for threatened birds in the Neotropics.* Birdlife Conservation Series, No. 5. Washington, DC: Birdlife International, Smithsonian Institution Press. 311 p.

Wegrzyn, M.J., A.E. Soto, y J.A. Pérez. 1984. Sinkhole development in north-central Puerto Rico. In Proceedings of the first multidisciplinary conference on sinkholes. Orlando, FL. pp. 137-142

Wetmore, A. 1916. *Birds of Puerto Rico.* Washington, DC: US Department of Agriculture. Bulleting 326. 59 p.

Wetmore, A. 1920. *Five New Species of Bird from Cave deposits in Porto Rico.* Proceedings Biological Society of Washington. 33: 77-78.

Wetmore, A. 1922. Bird remains from th e caves of Porto Rico. *Bulletin American Museum of Natural History.* 46: 297-333.

Wetmore, A. 1927. The birds of Puerto Rico and the Virgin Islands. Scientific Survey of Puerto Rico and the Virgin Islands. New York, NY: New York Academy of Sciences. Vol. IX: 322-323.

White, W.W. 1988. *Geomorphology and Hydrology of Karst terrains.* New York, NY: Oxford University Press. 464 p.

Wicks, C.M., y J.W. Troester. 1998. Ground water geochemistry of Isla de Mona, Puerto Rico. *Journal of Cave and Karst Studies.* 60(2): 107-114.

Wiewand, T.A. 1973. Mona ambphibians, reptiles, and mammals. En Mona and Monito islands: an assessment of their natural and historical resources. San Juan, PR: Puerto Rico Environmental Quality Board. 2:L1-L13.

Williams, E.E., y K.F. Koopman. 1951. A new fossil rodent from Puerto Rico. *American Museum of Natural History Novitates.* 1515: 1-9.

Wolcott, G.N. 1948. The insects of Puerto Rico. *Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico.* 32(1-4).

Woodbury, R.O. 1973. The vegetation of Mona Island. In Mona and Monito Islands: an assessment of their natural and historical resources. San Juan, PR: Puerto Rico Environmental Quality Board. 2: G1-G2.

Zack, A.L. y A. Class Cacho. 1984. *Restoration of freshwater in the Caño Tiburones area, Puerto Rico.* US Geological Survey Water Resources Investigations Report 83-4071. San Juan, PR. 33 p. + map.

Zack, A., T. Rodríguez Alonzo, y A. Román Más. 1986. Puerto Rico Ground-Water quality. In National water summary 1986. US Geological Survey Water-Supply Paper 2325. Washington, DC. 437-442 p.

Zans, V.A. 1959. Review, bauxites, their mineralogy and genesis. *Economic Geology.* 54: 957-965.

Terminología

Las definiciones de estos términos geológicos provienen principalmente de Monroe (1976). Puede consultar a Field (1999) para una lista más completa de terminología relacionada a las cavidades, al karso y a la hidrología del karso.

afloramientos de creta o de tiza (*chalk outcrops*): ver caliza de creta o de tiza.

agua agresiva (*aggressive water*): agua capaz de disolver rocas. En el contexto de la caliza y la dolomía, este término se refiere específicamente al agua que contiene dióxido de carbono disuelto.

alóctono (*allochthonous*): se dice del material depositado en un lugar distinto al de su origen.

anádromo (*anadromous*): se dice de los organismos acuáticos que remontan los ríos desde el océano (o desde un lago) para reproducirse.

arco natural (*natural arch*): arco de roca o un túnel natural muy corto.

bicarbonato (*bicarbonate*): toda sal que contenga la radical HCO_3^{-1}; por ejemplo: el Ca $(HCO_3)_2$.

bogaz (*bogaz*): grieta ensanchada por disolución de 2 a 4 m de ancho que se extiende de manera lineal por decenas de metros. Es un término turco.

bolo (*pellet*): Alimento masticado e insalivado que de una vez se deglute.(Diccionario de la lengua española de la Real Academia de la Lengua Española, 2001 - DRAE)

caliche (*caliche*): manto de creta o de tiza (o de caliza margosa) de origen secundario.

caliza de creta o de tiza (*chalky limestone*): una caliza micrítica de granos muy finos, mayormente consiste de despojos de algas de plancton. Usualmente es de color blanco y relativamente suave y porosa.

catádromo (*cathadromous*): dícese de los organismos acuáticos que migran río abajo hacia el océano (o hacia un lago) para reproducirse.

cavidad al pie de risco (*cliff-foot cave*): cueva formada al pie de un risco por disolución de agua estancada en un lago o pantano; las cavernas al pie de risco son comunes al nivel del mar o donde hubo algún punto de detención del nivel del mar. Se denomina también Füsshöhl, del alemán.

cavidad de cúpula (*dome pit*): cavidad vertical en una caverna, en general con techo abovedado y sima.

cavidad de refugio (*shelter cave*): pequeña cavidad en que la extensión horizontal máxima casi nunca excede el ancho de su boca u orificio.

cavidad fluvial (*river cave*): caverna en la cual fluye una quebrada o río, permanente o intermitente.

cavidad vertical (*vertical cave*): cavidad natural vertical, o casi vertical, en la superficie o en una caverna, en que la profundidad excede el ancho. Se conoce también como sima o pozo vertical.

cementación (*casehardening*): en el contexto de la terminología del karso, el endurecimiento de una capa de piedra caliza por la disolución y reprecipitación de carbonato de calcio.

charca de disolución (*solution pan*): depresión llana de disolución formada en la caliza, caracterizada por su fondo plano y lados voladizos. Sinónimos: Kamenitza, Opferkessel, *panhole* y tinajita.

clástico (*clastic*): se refiere a una roca o sedimento compuesto principalmente de fragmentos derivados de otras rocas o minerales, transportados a bastante distancia de su lugar de origen.

colapso de la cavidades (*cave breakdown*): (a) ensanchamiento de alguna parte de un sistema de cavernas debido al desprendimiento de masas de rocas de las paredes y techo. (b) rocas que han caído de las paredes y techos de la caverna.

conchero (*midden*): Depósito prehistórico de conchas y otros restos de moluscos y peces que servían de alimento a los hombres de aquellas edades. Generalmente se hallan a orillas del mar o de los ríos y cerca de las cuevas o cavernas. (DRAE)

condensación por corrosión (*condensation corrosion*): donde el agua que se condensa en las paredes de la caverna en roca soluble está subsaturada con respecto del mineral—calcita, dolomita, yeso, etc.— existe la posibilidad de disolución.

conductividad hidráulica (*hydraulic conductivity*): respuesta del acuífero a las gradientes hidráulicas. Es la velocidad del flujo del agua por una sección de 1 m^2 de un acuífero medido en m^3/día bajo una gradiente de 1m por m; las unidades se cancelan y los resultados se informan en m/d.

congéneres (*congeners*): clasificados en el mismo genero.

corredor (*corridor*): valle abierto o cerrado, por lo regular recto, cortado en roca soluble, de laderas empinadas o inclinadas. Ubicado principalmente en las grietas, diaclasas o puntos de debilidad.

corriente colgada (*losing stream*): Curso de agua separado del agua subterránea subyacente por una zona de material no saturado. (Glosario Internacional Hidrológico de la UNESCO)

cuesta (*cuesta*): una loma o cerro con un lado y escarpado por el otro; el declive leve por lo general corresponde a la inclinación de los lechos resistentes que lo conforman; y la pendiente casi vertical o lado escarpado se forma mediante la afloración del estrato resistente .

denudación kárstica (*karst denudation*): remoción de rocas de carbonatos mediante disolución. El término se usa por lo general en la determinación de la velocidad de descenso de la superficie mediante disolución.

depresión cerrada (*closed depression*): término general para cualquier depresión topográfica sin desagüe, independientemente del origen o tamaño.

detritívoros (*detritivores*): organismos que se alimentan de los desechos, como el guano, o materia orgánica muerta, como la madera y las hojas.

diagénesis (*diagenesis*): cambios posdeposicionales físicos y químicos en los sedimentos.

diagramas de Piper (*Piper diagrams*): diagramas múltiples trilineales en que se grafican la concentración de químicos en las muestras de agua tomadas a lo largo del curso. El diagrama muestra las tendencias en los datos.

disolución (*solution*): cambio de estado sólido o gaseoso a estado líquido mediante la combinación con un líquido. En el estudio científico de los fenómenos del karso, la erosión de rocas *karstificables* por medios químicos con la ayuda de ácidos, en particular el dióxido de carbono en el agua.

dolina (*doline*): depresión kárstica cerrada sencilla con drenaje subterráneo, en forma de plato, embudo o caldera. Su diámetro por lo general excede su profundidad. Las dolinas pueden tener cortes transversales o longitudinales asimétricos. Se subdividen según su forma o supuesto origen.

dolina colapsada, sumidero colapsado (*collapsed doline, collapsed sink*): depresión cerrada formada por el colapso del techo de una cavidad.

dominancia de especies (*species dominance*): se refiere al por ciento del área basal del rodal que ocupa determinada especie de árbol. Las especies dominantes ocupan la fracción más grande del área basal.

esclerofítica (*sclerophyllous*): vegetación de hojas **esclerófilas**.

esclerófila (*sclerophyll*): de las hojas de consistencia dura o cuerosa, por lo general siempreverdes, adaptadas para resistir la pérdida de agua.

espeleólogo (*speleologist*): científico que se dedica al estudio y la exploración de cuevas y cavernas, su entorno y su biota.

espeleotema (*speleothem*): depósito mineral secundario formado en las cavernas, tales como las estalactitas o las estalagmitas.

estalactita (*stalactite)*: depósito cilíndrico o cónico de minerales, comúnmente calcita, formado por el goteo del agua, que se suspende del techo de una caverna o de la base de un risco. La mayoría de las estalactitas tienen un tubo hueco en el centro.

estalagmita (*stalagmite*): depósito de materia mineral, comúnmente calcita, que asciende del lecho de la caverna, formado por la precipitación de minerales de soluciones que gotean desde arriba.

estrato de confinamiento impermeable (*impermeable confining bed*): estrato impermeable sobre o debajo del acuífero; anteriormente se denominaba acuicludo.

estruga (*struga*): corredor o trinchera formada mediante solución en un plano de estratificación en un estrato de piedra caliza en pendiente aguda.

estuario (*estuary*): lugar en la zona costera donde el agua salada y el agua dulce se mezclan.

excéntrica (*eccentric*): término europeo para espeleotema de forma anormal; en Estados Unidos por lo general se denominan **helictitas**.

exsurgencia (*exsurgence*): manantial de agua de cabecera superficial desconocida.

fanerozoico (*phanerozoic*): del eón en tiempo geológico que incluye las épocas (o eras) Paleozoica, Mesozoica y Cenozoica.

fisonomía (*physiognomy*): apariencia de la vegetación según determinado por los **tipos biológicos** y las especies de plantas que predominan.

fluviokarso (*fluviokarst*): término para describir cuando existe una mezcla de formaciones kársticas y características fluviales.

gallera (*cockpit*): (a) Toda depresión cerrada con laderas escarpadas. (b) Con mayor exactitud, las depresiones de forma irregular que rodean las lomas cónicas del karso de conos.

gradiente hidráulico (*hydraulic gradient*): medida de la pendiente de la superficie del agua entre dos puntos del caudal de la corriente de un arroyo o acuífero.

guano (*guano*): fertilizante, rico en fósforo, producto del excremento de los murciélagos o las aves.

helictita (*helictite*): proyección curva o angular en forma de rama estrecha en el lado o la base de una estalactita.

herbívoros (*herbivores*): organismo que obtiene su energía alimentándose de productores primarios, en general plantas verdes.

herpetofauna (*herpetofauna*): especies anfibios y reptiles dentro de determinada zona.

hidrograma (*hydrograph*): expresión gráfica de la etapa—nivel del agua—de un río o arroyo en función del tiempo.

hidroperiodo (*hydroperiod*): describe la profundidad, la extensión y la frecuencia de inundación de un humedal o cuerpo de agua.
holokarso (holokarst): término que se usa para describir formaciones con drenaje y topografía kárstica completa.

karren (*karren*): término alemán para rasgos menores de disolución superficiales y subterráneas en la topografía kárstica, como canales, surcos o depresiones disueltas en la superficie de la piedra caliza.

karso (*karst*): terreno en que el drenaje subterráneo sigue las cavidades en las rocas muy solubles (roca karstificable) y en que aparecen rasgos característicos superficiales y subterráneos (fenómenos kársticos). Las rocas muy solubles son principalmente la caliza, pero incluyen la dolomía, otras rocas carbonatadas, yeso, sal y otros. Nota: El DRAE recoge karst y kárstico, pero no karso, aunque reconoce que se usa en el Caribe y América Latina.

karso cónico (*cone karst*): tipo de topografía kárstica, común en el trópico, caracterizado por muchas lomas de pendientes casi verticales en forma de cono rodeadas por depresiones más o menos en forma de estrella; equivalente de **Kegelkarst** o **lapiaz**.

karso cónico con riscos (*cliffed cone karst*): karso de conos en que una torre de muros verticales surge de cada cono.

karso de cuesta (*cuesta karst*): tipo de karso formado en una cuesta, caracterizado por pendientes empinadas o escarpadas por un lado y sumideros y torres por el lado de declive menor.

karso de dolina (*doline karst*): topografía del karso caracterizada por la presencia predominante de dolinas.

karso de mogote o de torre (*tower karst*): término general para karso dominado por lomas escarpadas como el karso de conos y karso de mogotes.

karso de zanjón (*zanjon karst*): zona del karso en que predominan los zanjones.

karso encerrado (*impounded karst*): cuerpo de caliza karstificada de área limitada y completamente rodeada de roca de baja permeabilidad. El término en inglés lo propuso Jennings (1971) para el karso francés barré.

karstificación (*karstification*): el proceso de formación de un tipo de terreno en roca soluble con fenómenos superficiales y subterráneos producto de la disolución.

karstificar (*karstify*): formar fenómenos kársticos mediante disolución.

kegelkarst (*kegelkarst*): término alemán para el karso de conos

lapiaz (*lapiés*): término del francés que significa karren. linea de goteo (drip line): línea en la entrada de una cueva directamente debajo de la parte superior de la entrada.

macrófilas (*macrophyll*): plantas de hojas con un área superficial mayor de 164,025 mm^2.

manantial de karso (*karst spring*): Cualquier sumidero o punto de escape de agua del karso hacia una cueva o hacia la superficie.

mésico (*mesic*): de humedad intermedia. Hábitat húmedo.

mesófilas (*mesophyll*): plantas de hojas con un área superficial entre 18,225 mm^2 y 164,025mm^2. micrófilas (microphyll): plantas de hojas con un área superficial entre 2,025 mm^{2}y 18,225 mm^2.

mogote (*mogote/haystack hill*): loma caliza de laderas casi verticales, en general rodeada de planicies aluviales; inselberg (término alemán) kárstico y véase **karso de torre**.

nanófilas (*nanophyll*): plantas de hojas con un área superficial desde 225 mm^2 a 2,025 mm^2.

paisaje kárstico (*karst landscape*): ver **karso**

pepino (*pepino*): nombre usado por Hill (1899) y Hubbard (1923) para mogote.

piedra precipitada (*dripstone*): concreción de carbonato de calcio formado por goteras de agua y que pende desde arriba o surge desde abajo; término colectivo para rasgos como las estalactitas, estalagmitas, columnas, cortinaje, etc.

polje (*polje*): depresión extensa en terreno kárstico, cerrada por todos los lados, de fondo plano y lados escarpados. En muchos lugares los lados quedan a un ángulo agudo con respecto al piso. No brotan arroyos superficiales. Un polje puede ser completamente seco, tener un arroyo superficial que origina y termina dentro del polje o estar inundado de manera temporera o permanente. Es un término esloveno.

pozo de infiltración (*swallow hole, stream sink*): lugar donde un arroyo superficial desaparece por debajo de la tierra; sumidero de un riachuelo.

probabilidad de excedencia (*excedence probability*): flujo o descarga del arroyo mayor que el que se mide a determinado por ciento del tiempo en determinado lugar. Por ejemplo, si un río o arroyo tiene un flujo o descarga de 1 m^3/s el 99 por ciento del tiempo, la probabilidad de excedencia de flujo tendría que ser > 1 m^3/s un 1 por ciento de las veces.

puente natural (*natural bridge*): puente de roca sobre una cañada que no se haya erosionado.

receptor o grieta acuífera (stream sink): punto en que el riachuelo de superficie se sumerge; pozo de infiltración

refugio de roca (*abrigo de roca, abrigo rocoso, rock shelter*): cueva llana natural, por lo general debajo de un voladizo y de fondo más o menos plano.

resurgencia (*resurgence*): arroyo previamente hundido que vuelve a surgir; el término se usa comúnmente de manera incorrecta para referirse a cualquier surgencia.

rezumadero (*seep*): Agua que emerge del terreno a lo largo de una línea o superficie. (Glosario Internacional Hidrológico de la UNESCO)

rillenkarren (*rillenkarren*): término del alemán para los canales llanos erosionados mediante disolución de la piedra caliza, separados por estrías agudas con 2 a 3 cm de separación.

rinnenkarren (*rinnenkarren*): ranuras de fondo plano separadas por estrías agudas con varios centímetros de separación; término alemán.

roca de playa (*beachrock*): roca friable a indurada que consiste de granos de arena de variados minerales endurecidos por el carbonato de calcio; arena de playa naturalmente endurecida.

roca karstificable (*karstifiable rocks*): término colectivo para toda roca en que se pueden desarrollar fenómenos kársticos debido a que es soluble en agua.

salinización (*salinization*): intrusión de agua de mar en el acuífero.

sifón (*siphon*): lugar donde el techo de la cueva se sumerge bajo agua estancada o corriente; esta inmersión o buzamiento separa partes de la cavidad que de otra manera estarían unidas.

sima (*shaft*): pasaje vertical en una cavidad o cueva vertical en la superficie.

simpátrico (*sympatric*): se refiere al origen o el área de ocupación de dos o más especies estrechamente relacionadas en la misma zona geográfica.

sistema de cavidades (*cave system*): Una red subterránea de cavidades interconectadas.

spitzkarren (*spitzkarren*): término en alemán para picos en forma de lanzas o agujas de torre formadas de caliza residual de la disolución, desde unos pocos centímetros de largo hasta más de 1 m.

subsidencia (*subsidence*): hundimiento gradual o asentamiento en un nivel inferior, como el descenso paulatino del techo de una caverna o la superficie encima de la cavidad.

sufosión (*tubificación, soil piping*): formación de túneles o cavidades tubulares debajo de la superficie, por acción del agua. Se conoce también como tunelamiento.

sumidero (*sink, sinkhole*): término usado en general para las depresiones cerradas, en particular las dolinas, cavidades verticales y pozos de infiltración.

sumidero colapsado (*collapsed sink*): ver **dolina colapsada**

superficie potenciométrica (*potentiometric surface*): nivel freático de los acuíferos.

surgencia (*emergence*): manantial del karso con una gran cantidad de agua. Estos manantiales se clasifican, cuando sea posible en manantiales de **exsurgencia** y de **resurgencia**.

tipo biológico (*life form*): forma o apariencia característica de una especie en su madurez, por ejemplo, árbol, hierbas, gusano, pez, etc.

tipo de karso (*karst type*): terreno del karso cuya superficie se caracteriza por la existencia de un solo rasgo kárstico dominante o conjunto de rasgos. Los nombres de los tipos de karso dependen de los aspectos geográficos, geológicos, hidrológicos, climáticos y genéticos predominantes. Algunos ejemplos son el karso tropical y el karso de torres.

toba (*sinter*): material de concreción caliza, en general cristalina, depositada por agua corriente tanto en la superficie como en las cavidades.

torre (*tower*): loma muy escarpada en el karso.

transmisividad hidrológica del acuífero (*transmissivity of water by an aquifer*): el volumen de agua que fluye al día por una sección del acuífero (conductividad hidráulica) multiplicado por su espesor: $[(m^3/d)/m^2]m$; las unidades se cancelan y los resultados se informan en m^2/d.

travertina (*travertine*): piedra caliza precipitada de un arroyo, en general más cementada y resistente que la toba calcárea.

troglobítico (*troglobitic*): o troglobita; animal que habita permanentemente debajo de la tierra en las áreas oscuras de las cavernas. Sólo sale de casualidad. La criatura está totalmente adaptada a la vida en la oscuridad absoluta y sólo puede completar su ciclo vital en la cueva.

troglofílico (*troglophilic*): o troglofilo; animal que penetra intencionalmente y habitualmente más allá del área de la caverna donde entra la luz del día y pasa parte de su vida en ambientes subterráneos, por ejemplo, los murciélagos.

túnel natural (*natural tunnel*): cavidad casi horizontal, abierta a ambos extremos, por lo regular, bastante recto y de corte transversal uniforme.

uvala (*uvala*): una depresión kárstica grande, en forma de cubeta o de forma alargada, de fondo irregular, por lo general con dolinas dispersas. Es un término esloveno.

vaguada (*thalweg*): línea de profundidad máxima en el corte transversal de una corriente.

valle cegado (*blind valley*): valle que termina río abajo en una cuesta empinada o un risco río arriba; cualquier corriente en un valle que desaparece bajo la tierra por una sima o en una caverna.

valle seco (*dry valley*): valle que carece actualmente de un arroyo o río debido al desagüe subterráneo.

valor de importancia (*importance value*): índice de la importancia de una especie en una comunidad de plantas; incluye la densidad relativa, la frecuencia relativa y el área basal relativa de la especie. Los valores varían desde 0 a 300 o se pueden expresar en por cientos.

xérico (*xeric*): de hábitat seco.

zanjón (*zanjon*): trinchera creada por disolución en la piedra caliza, por lo general desde unos pocos centímetros hasta varios metros de ancho, desde 1 a 4 m de profundidad y desde decenas a más de miles de metros de largo. Es el término usado en Puerto Rico para corredor.

zona silvestre (*wilderness*): zona agreste, deshabitada, donde las condiciones naturales predominan sobre las antropogénicas.

El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) prohibe la discriminación en todos sus programas y actividades por razón de raza, color, nacionalidad, sexo, religión, edad, necesidades especiales, creencias políticas, orientación sexual o estado civil. (No todas las áreas de prohibición aplican a todos los programas). Las personas con necesidades especiales que requieran de métodos alternos de comunicación para obtener información de programas (Braille, impresos especiales, cintas en audio, etc.) pueden llamar al TARGET Center del USDA al (202) 720-2600 (voz y TDD).

Para someter una querella por discriminación, puede escribir al USDA, Director, Office of Civil Rights, Room 326-W, Whitten Building, 1400 Independence Avenue, SW, Washington, D.C. 20250-9410 o puede llamar al (202) 720-5964 (voz y TDD). El USDA es un patrono y proveedor con igualdad de oportunidad.